Numerical Analysis of the Hydrodynamic Behavior of Three-Phase Mixing of Rice Husk, Sand, and Air in a Bubbling Fluidized Bed with Particle Granular Behavior*

Research Article

Reza Karimi Ahmadi[1] Hamid Reza Nazif[2]

1. Introduction

Biomass is recognized as a vital renewable energy source worldwide. Mixing and segregation of the biomass particles and bed material play a crucial role in the gasification process of the fluidized bed. A good mixing of these particles improves the quality of the synthesized gases emitted from the biomass gasification process. Limited experimental and numerical studies have been conducted to evaluate the optimal mixing conditions of biomass and bed material in the bubbling fluidized bed.

This study aimed to investigate the effects of wall boundary conditions for solid phases and the restitution coefficient of the particles on the mixing behavior of biomass (rice husk) and bed material (silica sand) in the bubbling fluidized bed reactor. In this study, the effect of three wall boundary conditions for solid phases was investigated including free slip ($\emptyset$ = 0), partial slip ($\emptyset$ = 0.5), and no-slip ($\emptyset$ = 1) on the time-averaged volume fraction and velocity of solid particles in the bubbling fluidized bed. Then, the effect of the restitution coefficient on the time-averaged volume fraction and velocity of biomass (rice husk) and bed material (silica sand) particles in the bubbling fluidized bed was studied. For this study, the equations governing the Eulerian multiphase flow approach were solved along with the kinetic energy theory of solid particles in laminar air flow using computational fluid dynamics by finite volume method with Ansys Fluent software V.17.2.

2. Modeling

The primary phase of air was utilized as the fluidized agent, while the two granular solids of rice husk and sand were employed as the biomass and the bed materials, respectively. Figure 1 shows a schematic of a mixture of rice husk and silica sand particles in a two-dimensional bubbling bed under study. The diameter of silica sand particles was 440 μm with the density of 2600 kg/m^3. The diameter of rice husk particles was 1540 μm and its density was 950.6 kg/m^3. At the inlet boundary of the fluidized bed reactor, air (fluidization agent) without particles entered the bed from the reactor floor with a uniform velocity of 0.79 m/s. Therefore, at the inlet, the volume fraction of the solid phases of rice husk and silica sand was zero. In the walls, the no-slip boundary condition was used for the gas phase and the Johnson and Jackson slip boundary condition was utilized for the solid phases. At the reactor outlet, the outlet pressure (atmospheric pressure) was applied. Also, the bed was initially filled to a height of 0.2 m with particles of silica sand and rice husk with a volume fraction of 0.5133 and 0.0867, respectively.

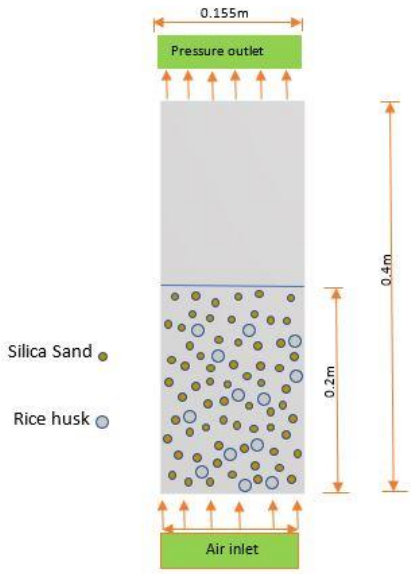


Figure 1. The schematic of mixing the rice husk and silica sand particles in the bubbling fluidized bed reactor studied

3. Solution procedure

In Ansys Fluent software, Eulerian multiphase flow equations are solved, correlated, and separated such as momentum equations, co-pressure equations, and volume fraction equations of different phases. By solving the equations separately, the Ansys Fluent software uses the Phase Coupled SIMPLE (PC-SIMPLE) algorithm for pressure-velocity correlation. PC-SIMPLE Algorithm is an extended form of a SIMPLE algorithm for a multi-phase current approach. In this research, for the unsteady formulation, a second-order implicit scheme was used, while the second-order scheme was utilized for the discretization of volume fractions and momentum. The simulation time was 30 s with an averaging time of 25 s (5-30 s). For better convergence and stability in this study, the time step of 0.0001 was used. The maximum number of iterations per time step was 200 iterations. The convergence criterion for the maximum residuals between the two iterations was 0.001.

Effect of specularity coefficient on the mixing behavior of rice husk and silica sand particles in bubbling fluidized bed

The specularity coefficient for the granular flow determines the impact fraction causing the momentum transfer to the walls. The value of the specularity coefficient is from 0 to 1. Three coefficients of specularity

* Manuscript received:10 July 2021; Revised, 26 February 2022, Accepted, 15 June 2022.
1. MSc. Student, Mechanical Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2. Corresponding Author. Associate Professor, Mechanical Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. **E-mail:** nazif@eng.ikiu.ac.ir.

were investigated including free slip (∅ = 0), partial slip (∅ = 0.5), and no-slip (∅ = 1) without changing other parameters. In this study, air inlet velocity, volume fraction, and particle density were assumed to be constant. Moreover, the restitution coefficients between sand-sand, rice husk-rice husk, and rice husk-sand particles were 0.9, 0.6, and 0.6, respectively.

Effect of restitution coefficient on the mixing behavior of rice husk and silica sand in bubbling fluidized bed .
The restitution coefficient between solid phases indicates the interactions of particles in the fluidized bed. It causes momentum changes and energy fluctuations during interactions between phases. The restitution coefficient affects bulk viscosity, solid pressure, and shear stress of the solid phase. In this study, three types of rice husks were selected. Three restitution coefficients were investigated between rice husk (biomass) and silica sand (bed material) particles on the mixing behavior of rice husk and silica sand in the bubbling fluidized bed. The partial slip coefficient was used for both solid phases. Air inlet velocity, particle volume fraction, and particle density were assumed to be constant. For this study, the restitution coefficient of sand-sand particles was 0.9 as a constant, and the restitution coefficient of sand-rice husk and rice husk-rice husk particles were 0.6, 0.7, and 0.9, respectively.

4. Conclusion

This study investigated the effects of wall boundary conditions for solid phases. Using the Eulerian multi-phase approach along with the kinetic theory of granular flow, the restitution coefficient between solid particles of rice husk and silica sand on the mixing process of biomass (rice husk) and bed material (silica sand) in the bubbling fluidized bed was discussed. We studied the time-averaging distribution of the velocity of rice husk and silica sand particles, the time-averaging distribution of volume fraction of rice husk and silica sand particles, and pressure drop. To assess the effect of specularity coefficient, three specularity coefficients were investigated including free slip (∅ = 0), partial slip (∅ = 0.5), and no-slip (∅ = 1). It was revealed that the volume fraction of rice husk and silica sand particles in the walls and the core of the bed was higher than the partial slip and no-slip in the case of free slip (∅ = 0). Examining the pressure drop in the fluidized bed showed that in free slip conditions, the pressure drop was 8.09% and 14.2% less than partial slip and no-slip, respectively. The time-averaging profile of velocity and volume fraction of rice husk and silica sand particles was different in free slip conditions (∅ = 0) from no-slip (∅ = 1) and partial slip (∅ = 0.5). In the case of the partial slip, the highest velocity of rice husk and silica sand particles was observed. As a result, by increasing the velocity of the rice husk and the silica sand particles, a more uniform mixing occurred between the rice husk particles and the silica sand. Then, the effect of the restitution coefficient of particles was investigated. For this study, the restitution coefficient of sand-sand particles was 0.9 as a constant, and the restitution coefficient of between sand and rice husk particles and rice husk-rice husk particles were 0.6, 0.7, and 0.9, respectively. It was indicated that with decreasing restitution coefficient between particles, the velocity of rice husk and sand particles increased by about 9%, while the pressure drop decreased by about 22%. It was also observed that with decreasing the restitution coefficient, the velocity of rice husk and silica sand particles, as well as the inelastic collisions increased. Therefore, the mechanical energy dissipation due to the collision of rice husk and silica sand particles increased, increasing the mixing of rice husk and silica sand particles.

DOI: 10.22067/jacsm.2022.71387.1041 https://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir/

تحلیل عددی رفتار هیدرودینامیک اختلاط سه فازی پوسته برنج، شن و هوا در بسترسیال حبابی با رفتار دانه‌ای ذرات*

رضا کریمی احمدی(۱) حمیدرضا نظیف(۲)

چکیده زیست‌توده به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر در سرا سر جهان از اهمیت زیادی برخوردار ا ست. نقش اختلاط و جدایش ذرات زیست‌توده و ماده بستر در فرایند گازی‌سازی بسترسیال بسیار حائز اهمیت است. هر چه میزان اختلاط این ذرات به‌خوبی انجام شود، کیفیت گازهای سنتز شده خروجی از فرایند گازی‌سازی زیست‌توده افزایش می‌یابد. این پژوهش بااستفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود به بررسی فرایند اختلاط سه فازی پوسته برنج، شن و هوا در بسترسیال حبابی می‌پردازد. این پژوهش بااستفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ١٧/٢ انجام شده‌است. تأثیر ضریب برخورد بین ذرات و شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد در فرایند اختلاط زی ست‌توده و ماده ب ستر مطالعه شده ا ست. از رویکرد جریان چند فازی اویلرین با متو سطگیری زمانی از سرعت و کسر حجمی فازهای جامد در این مطالعه استفاده شده‌است. فاز اولیه هوا به‌عنوان عامل سیالیت و دو فاز جامد دانه‌ای ثانویه شامل پوسته برنج در نقش زیست‌توده و شن در نقش ماده بستر و کاتالیزور به‌کاررفته‌است. ابعاد بسترسیال حبابی موردمطالعه (٠/٤×٠/١٥٥) متر می‌با شد. در این پژوهش، تأثیر لغزش آزاد ($\emptyset = 0$)، لغزش جزئی ($\emptyset = 0.5$) و بدون لغزش ($\emptyset = 1$) برای ذرات در برخورد با دیوار بررسی شده‌است. مطالعه شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد نشان می‌دهد، توزیع متو سط زمانی ک سر حجمی و سرعت برای حالت لغزش جزیی و بدون لغزش تقریباً نزدیک به هم می‌با شند. در شرایط لغزش جزیی، سرعت ذرات پوسته برنج و شن در مقایسه با دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد. لذا، هر چه سرعت ذرات در بستر افزایش یابد، اختلاط و توزیع یک‌نواخت ذرات در بستر افزایش و جدایش و تفکیک ذرات کاهش می‌یابد. برر سی افت ف شار در ب ستر سیال ن شان می‌دهد، در شرایط لغزش آزاد، افت ف شار به‌ترتیب ٨/٠٩٪ و ١٤/٢٪ نسبت‌به دو حالت لغزش جزیی و بدون لغزش کمتر می‌با شد. هم‌چنین سه نوع پوسته برنج با ضرایب برخورد متفاوت مطالعه شده‌ا ست. درنتیجه این مطالعه، با کاهش ضریب برخورد بین ذرات، سرعت ذرات پو سته برنج و شن حدود ٩٪ افزایش و افت ف شار حدود ٢٢٪ کاهش می‌یابد. هر چه ضریب برخورد کاهش پیدا کند، برخوردهای الا ستیک نیز کاهش می‌یابد، درنتیجه اضمحلال انرژی مکانیکی نا شی از برخورد ذرات افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این حالت، اختلاط ذرات پوسته برنج و شن افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی بسترسیال حبابی، رویکرد اویلرین، هیدرودینامیک، زیست‌توده، اختلاط ماده بستر و زیست‌توده، ضریب برخورد، ضریب برخورد آیینه‌ای، شرط مرزی دیوار برای فاز جامد.

مقدمه

راکتورهای بسترسیال به‌دلیل نرخ انتقال حرارت بالا، انتقال جرم و توانایی جداسازی محصولات جامد از اجزای فرار تولیدشده در طول عملیات، در تجزیه شیمیایی حرارتی زیست‌توده بسیار مهم هستند. امروزه تخمین زده می‌شود حدود ١٣ درصد از انرژی جهان توسط سوخت‌های مشتق شده از زیست‌توده تأمین می‌شود (دمیرباس و همکاران [1]). ذرات زیست‌توده به‌دلیل شکل، اندازه و چگالی خاصشان بدون وجود ماده بستر مانند شن سیلیس در راکتور بسترسیال، نمی‌توانند به‌طور یک‌نواخت مخلوط شوند. پژوهش‌های اندکی رفتار اختلاط ذرات زیست‌توده با ماده بستر را در راکتور بسترسیال بررسی کرده‌اند. برخی از مطالعات تجربی فقط در جهت تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های سیال‌سازی زیست‌توده مانند حداقل سرعت سیالیت انجام شده‌است (رائو و همکاران [2]، عبدالله و همکاران [3]، کلارک و همکاران [4]، ژانگ و همکاران [5]). تجزیه‌وتحلیل تجربی هیدرودینامیک زیست‌توده در یک راکتور بسترسیال توسط گرس و کوی [6] انجام شده‌است. کیاکویین [7] مطالعه تجربی در جهت بررسی تجزیه‌وتحلیل رفتار اختلاط زیست‌توده (پوسته برنج) و ذرات شن انجام داده‌است. ژی و همکاران [8] در تحقیقی به بررسی رفتار اختلاط و جدایش ذرات در راکتور بسترسیال پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها در پیش‌بینی توزیع کسر حجمی ذرات از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. هم‌چنین آن‌ها

* تاریخ دریافت مقاله ١٤٠٠/٤/١٩و تاریخ پذیرش آن ١٤٠١/٣/٢٥می‌باشد.
(١) دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران.
(٢) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران.
E-mail: nazif@eng.ikiu.ac.ir

نشان دادند با افزایش ضریب برخورد از ۰/۱ به ۰/۹۵، تجمع ذرات سنگین‌تر در کف بستر افزایش می‌یابد. هم‌چنین در این پژوهش، اثر سرعت هوای ورودی و نسبت قطر ذرات برروی رفتار اختلاط و جدایش ذرات بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت هوای ورودی، جدایش ذرات افزایش می‌یابد. حمید و همکاران [9] در پژوهشی به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار اختلاط و جدایش ذرات شن سیلیس و سلولز پرداختند. این پژوهش نشان داد با افزایش سرعت هوای ورودی، بین ذرات شن سیلیس و سلولز اختلاط بهتری انجام می‌شود. هم‌چنین این پژوهش نشان داد ذرات سلولز با قطر بزرگ‌تر اختلاط مناسب‌تری با ذرات شن سیلیس با چگالی بیشتر و قطر کوچک‌تر دارند. آنیسیس و همکاران [10] در پژوهشی به بررسی اختلاط و جدایش ذرات جامد در بسترسیال متراکم پرداختند. آن‌ها در این پژوهش مدل پسا شملال- ابراین کوپل‌شده با مدل فشار فاز جامد و توزیع شعاعی لون و همکاران را با مدل پسا کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی (ای-ام-ام-اس) کوپل‌شده با مدل فشار فاز جامد و توزیع شعاعی Ma-Ahmadi مقایسه کردند. این پژوهش نشان داد که مدل پسا کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی کوپل‌شده با مدل فشار فاز جامد و توزیع شعاعی Ma-Ahmadi از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. کرمی و همکاران [11] در پژوهشی به بررسی پدیده جدایش ذرات در بسترسیال پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد ذرات سنگین‌تر در بستر، فعل‌وانفعالات ذرات سبک و سنگین در بستر بهبود می‌یابد، درنتیجه اختلاط ذرات در بستر افزایش می‌یابد.

برای شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی زیست‌توده در راکتور بسترسیال، عمدتاً دو رویکرد اویلر- اویلری و اویلر- لاگرانژی استفاده‌شده‌است. رویکرد اویلر- اویلری به‌دلیل امکان استفاده در راکتورهای بسترسیال با مقیاس بزرگ‌تر، هزینه محاسباتی پایین‌تر و سطح جزئیات ارائه‌شده بهتر، بیشتر موردتوجه پژوهشگران قرارگرفته‌است. در رویکرد اویلر- اویلری فازهای جامد و گاز پیوسته رفتار می‌کنند و دائماً در هم نفوذ می‌کنند و تعامل بین آن‌ها بااستفاده از نیروی پسا محاسبه می‌شود. پژوهش‌های بسیاری به بررسی و مقایسه مدل‌های پسا در بسترسیال حبابی گاز- جامد پرداختند. خزری و همکاران [12] در مطالعه‌ای به بررسی انواع مدل‌های رژیم جریان آشفته و مدل‌های پسا برروی هیدرودینامیک راکتور گازی ساز بسترسیال حبابی پرداختند. این پژوهش نشان داد که مدل آشفتگی کا- اپسیلون آر- ان- جی و مدل پسا شملال- ابراین از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. هم‌چنین مشاهده شد که الگوی توزیع افت فشار در بستر در رژیم جریان آشفته متفاوت از رژیم جریان آرام است. وانگ و همکاران [13] در تحقیقی به مقایسه مدل‌های پسا برروی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال حبابی سه‌بعدی پرداختند. در این پژوهش سه مدل پسا گیداسپاو، شملال- ابراین و ون- یو بررسی شد. این پژوهش نشان داد که مدل پسا گیداسپاو به‌خوبی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال را پیش‌بینی می‌کند. وارگسه و واکامالا [14] در تحقیقی به بررسی انواع مدل‌های آشفتگی و انواع مدل‌های پسا برروی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال حبابی سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش سه مدل پسا گیداسپاو، شملال- ابراین و کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی (ای- ام- ام- اس) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که انتخاب رژیم جریان آشفته کا- اپسیلون به‌همراه مدل پسا کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. اپاده‌ای و همکاران [15] در مطالعه‌ای به بررسی اثر مدل‌های مختلف پسا برروی رفتار هیدرودینامیک رایزر بسترسیال گردشی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش نتایج حاصل از شش مدل پسا را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قراردادند. این پژوهش نشان داد که نتایج حاصل از مدل‌های پسا گیداسپاو، ون- یو، هولین- گیداسپاو و شملال- ابراین در قسمت بالایی رایزر در پیش‌بینی توزیع ذرات جامد از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. در حالی‌که نتایج حاصل از مدل‌های پسا گیبیلارو و هلند در قسمت پایینی رایزر در پیش‌بینی توزیع ذرات جامد از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. لهلاتی و همکاران [16] در پژوهشی به بررسی مدل پسا اصلاح‌شده شملال- ابراین در تطابق با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. این پژوهش نشان داد که مدل پسا اصلاح‌شده شملال- ابراین از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی در پیش‌بینی افت فشار و انبساط بستر برخوردار است. در بیشتر مطالعات انجام‌شده بسترسیال، تمرکز اصلی برروی رفتار هیدرودینامیک فاز جامد منفرد در حضور گاز بوده‌است. زینانی و همکاران [17] پژوهشی در جهت بررسی اثر مدل پسا برروی خواص سیالیت بسترسیال گاز- جامد انجام دادند. آن‌ها از این پژوهش دریافتند پسا گیداسپاو و هیل- کوچ- لند در پیش‌بینی

شکل حباب‌ها از اعتبار خوبی برخوردار می‌باشند. گاو و همکاران [18] در پژوهشی، به بررسی اثر انواع مدل‌های گرادیان و رژیم آشفتگی برروی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و سرعت محوری ذرات در بسترسیال گاز- جامد پرداختند. آن‌ها دریافتند مدل گاووس به‌خوبی می‌تواند الگوی جریان را پیش‌بینی کند. هم‌چنین آن‌ها دریافتند مدل آشفته کا- اپسیلون آر- ان- جی در مقایسه با سایر مدل‌های آشفتگی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. ورما و همکاران [19] در پژوهشی به بررسی اثر اندازه قطر بستر برروی حرکت ذرات جامد و حباب‌ها به‌کمک رویکرد جریان دوفازی اویلرین و تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای در بسترسیال سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش پنج اندازه قطر بستر را بررسی کردند. در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش اندازه قطر بستر، کسر حجمی ذرات در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد. اندازه و سرعت حباب‌ها نیز با افزایش اندازه قطر بستر افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [20] در پژوهشی به بررسی اثر سرعت هوای ورودی برروی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال پرداختند. این مطالعه نشان داد با افزایش سرعت هوای ورودی، توزیع کسر حجمی ذرات جامد در ناحیه بسترسیال کاهش می‌یابد. آیچه و همکاران [21] در پژوهشی به بررسی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال سه‌بعدی پرداختند. در این پژوهش از ذرات جامد گروه گلدارت D استفاده شد. هم‌چنین در این پژوهش از رویکرد جریان دوفازی اویلرین همراه با رژیم جریان آشفتگی کا- اپسیلون در پیش‌بینی رفتار ذرات گروه گلدارت D استفاده شد. این پژوهش نشان داد که نتایج حاصل از حل عددی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی عزیزی و همکاران برخوردار است. در رویکرد اویلر- اویلری، معادلات پیوستگی، بقای جرم و ممنتم به‌طور جداگانه برای هر فاز بیان می‌شوند. هم‌چنین خواص فاز جامد بااستفاده از تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای به‌دست می‌آید. ازاین‌رو گرانروی و فشار فاز جامد برای مدل‌سازی موردنیاز است. تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای به‌طور گسترده به‌عنوان یک مدل اساسی برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان فاز جامد پذیرفته شده‌است. تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای براساس تئوری گازهای متراکم غیریک‌نواخت توسط چاپمن و همکاران [22] بیان شده‌است. رویکرد تئوری انرژی جنبشی از مدل یک معادله‌ای برای تعیین انرژی جنبشی آشفته یا دمای دانه‌ای ذرات استفاده می‌کند. رویکرد تئوری انرژی جنبشی در جریان‌های دانه‌ای باعث می‌شود، تعیین فشار و گران‌روی فاز جامد ازنظر روابط تجربی که اتلاف انرژی ناشی از برخورد ذرات با ذرات (ضریب برخورد) را در نظر می‌گیرد، امکان‌پذیر شود. تاکنون پژوهش‌هایی در زمینه ضریب برخورد آیینه‌ای و شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد منفرد در راکتور بسترسیال حبابی انجام شده‌است. اگرچه این ضریب در راکتور بسترسیال حبابی در مقیاس کوچک نیز تأثیر قابل‌توجهی دارد. در مطالعاتی که انجام شده‌است از شرایط مرزی مختلفی برای فاز جامد استفاده شده‌است. برخی از محققان ترجیح دادند از شرط مرزی بدون لغزش استفاده کنند (دو و همکاران [23]، لی و گنسر [24]، وانگ [25]، ژو و همکاران [26]). بقیه پژوهشگران نیز از شرط مرزی لغزش استفاده کرده‌اند. در شرایط لغزش، مقادیر مختلف ضریب لغزش مورد استفاده قرار گرفته‌است. بعضی از پژوهشگران از ضریب لغزش جزئی استفاده کرده‌اند (آرمسترانگ و همکاران [27]، گلد اشمیت و همکاران [28]، جانگ و همکاران [29]، وانگ و همکاران [30]). هم‌چنین بقیه پژوهشگران نیز از شرط لغزش آزاد استفاده کرده‌اند (ساسیس و همکاران [31]، ون واچم و همکاران [32]، وانگ و همکاران [33]، یانگ و همکاران [34]). به‌رغم استفاده از شرایط مرزی مختلف دیوار برای فاز جامد، همه آن‌ها گزارش دادند که نتایج پژوهش از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار می‌باشد. همان‌طور که بررسی شد، پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده‌است، تمرکزشان برروی شرایط مرزی دیوار برای فاز جامد منفرد بوده‌است و در پژوهش‌های معدودی به بررسی شرایط مرزی دیوار در سیستم‌های دارای بیش از یک فاز جامد می‌باشند، پرداخته شده‌است. هم‌چنین پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی جریان بستر گاز جامد به ضریب برخورد ذرات با ذرات بستگی دارد. گلد اشمیت و همکاران [28]، در مطالعه‌ای به بررسی ضریب برخورد ذرات با یکدیگر پرداختند. آن‌ها نشان دادند که هیدرودینامیک بسترسیال متراکم به‌شدت به انرژی تلف‌شده ناشی از برخوردهای ذرات با یکدیگر بستگی دارد. کشتریمایوم و همکاران [35] در پژوهشی، به بررسی اثر ضریب برخورد بین ذرات برروی انبساط بسترسیال حبابی پرداختند. این پژوهش نشان داد که با افزایش ضریب برخورد بین ذرات از ۰/۹ تا ۰/۹۹ انبساط بستر افزایش می‌یابد. هم‌چنین در ادامه این پژوهش اثر ضریب برخورد آیینه‌ای بررسی شد، این مطالعه نشان داد که با کاهش ضریب برخورد

آیینه‌ای، کسر حجمی و سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد. فد و همکاران [36] در پژوهشی به بررسی اثرات ضریب برخورد بین ذرات و ضریب برخورد آیینه‌ای برروی بسترسیال متراکم سه‌بعدی پرداختند، این پژوهش نشان داد که اندازه حباب‌ها و انبساط بستر با کاهش ضریب برخورد بین ذرات افزایش می‌یابد. عبدالمطلب و همکاران [37] در پژوهشی به بررسی رفتار هیدرودینامیک و انتقال حرارت بسترسیال پرداختند. آن‌ها در این پژوهش اثرات ضریب برخورد آیینه‌ای و ضریب برخورد بین ذرات را برروی انتقال حرارت دیوار به بستر و رفتار هیدرودینامیکی بستر بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب برخورد آیینه‌ای و ضریب برخورد بین ذرات برروی انتقال حرارت از دیوار به بستر تأثیر اندکی دارد ولی برروی رفتار هیدرودینامیکی بسترسیال به‌ویژه افت فشار بستر تأثیر فراوانی دارد. کوتوکی و همکاران [38] در پژوهشی به بررسی اثر ضریب برخورد بین ذرات و ضریب برخورد آیینه‌ای برروی هیدرودینامیک بستر کانال افقی پرداختند. این پژوهش نشان داد که در مقادیر خاص ضریب برخورد در مرکز بستر سرعت ذرات جامد و گاز افزایش و در دیوارها کاهش می‌یابد. هم‌چنین این پژوهش نشان داد با افزایش ضریب برخورد آیینه‌ای، سرعت ذرات جامد و گاز افزایش می‌یابد. هولین و همکاران [39]، نشان دادند که برای به‌دست آوردن یک شبیه‌سازی واقع‌گرایانه از بسترسیال بااستفاده از یک مدل بنیادی هیدرودینامیکی، در نظر گرفتن اثر فعل‌وانفعالات ذرات از اهمیت بالایی برخوردار است. تقی‌پور و همکاران [40]، مطالعه‌ای در زمینه هیدرودینامیک راکتور بسترسیال گاز جامد دوبعدی با ضرایب برخورد متفاوت انجام دادند، آن‌ها حساسیت بالاتری را در هنگامی‌که سرعت از حداقل سرعت سیالیت بالاتر باشد دریافتند. همان‌طور که اشاره شد، بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده تمرکزشان برروی ضریب برخورد ذرات تک‌فاز جامد در راکتور بسترسیال بوده‌است.

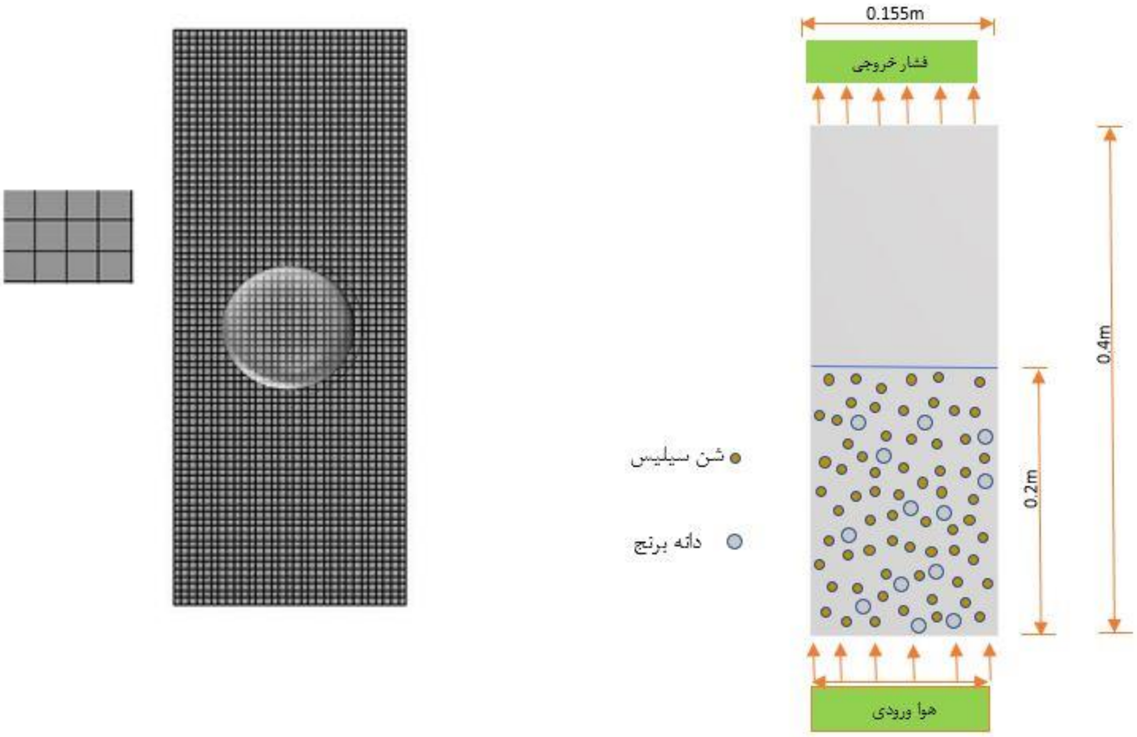
پژوهش‌های تجربی و عددی انجام‌شده برای ارزیابی شرایط مطلوب اختلاط زیست‌توده و ماده بستر در بسترسیال حبابی محدود می‌باشد. به‌علاوه برای افزایش انتقال گرما و جرم در هنگام تجزیه ترموشیمیایی زیست‌توده در یک راکتور بسترسیال حبابی باید پارامترهای مختلفی مانند تأثیر سرعت ورودی هوا، چگالی زیست‌توده، قطر ذرات زیست‌توده، ضریب برخورد ذرات و شرایط مرزی دیوار بررسی شود. هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثر شرایط مرزی دیوار برای فازهای جامد و ضریب برخورد ذرات با یکدیگر برروی رفتار اختلاط زیست‌توده (پوسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در یک راکتور بسترسیال حبابی می‌باشد. در این پژوهش اثر سه شرط مرزی دیوار برای فازهای جامد، لغزش آزاد ($\emptyset = 0$)، لغزش جزئی ($\emptyset = 0.5$) و بدون لغزش ($\emptyset = 1$) برروی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات زیست‌توده (پوسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در بسترسیال حبابی بررسی شده‌است. در ادامه، اثر ضریب برخورد ذرات با یکدیگر برروی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات زیست‌توده (پوسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در بسترسیال حبابی مطالعه شده‌است. برای انجام این مطالعه، معادلات حاکم بررویکرد جریان چند فازی اویلرین به‌همراه تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای ذرات جامد در جریان هوای آرام بااستفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به‌روش حجم محدود به‌کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۷/۲ حل شده‌است.

مدل‌سازی اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در راکتور بسترسیال حبابی

طرح‌واره اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی دوبعدی و Planar با عرض ۰/۱۵۵ متر و ارتفاع ۰/٤ متر در شکل (۱- الف) نشان داده‌شده‌است. در این مسئله فرض شده‌است که عمق راکتور نسبت‌به طول و عرض آن بی‌نهایت است؛ یعنی از اثرات ضخامت صرف‌نظر شده‌است. هم‌چنین در مقاله شارما و همکاران [57] به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از حل عددی دوبعدی و سه‌بعدی با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده‌است. این مقاله نشان می‌دهد تفاوت اندکی در نتایج حل دوبعدی و سه‌بعدی وجود دارد. هم‌چنین در طراحی راکتور بسترسیال مورد مطالعه، مرکز راکتور بسترسیال، مبدأ مختصات در نظر گرفته‌شده‌است. در بستر موردبررسی از تقارن استفاده نشده‌است؛ علت این موضوع این است که در صورت انتخاب نیمه این بستر طبیعتاً محاسبات سریع‌تر و کم‌حجم‌تر خواهد بود اما مشکل اساسی آن، این است که برای بررسی خطای محاسباتی

با داشتن فقط نیمه بستر دچار مشکل می‌شویم؛ لذا مسئله به‌صورت دوبعدی Planar بررسی شد تا امکان چک تقارن نتایج وجود داشته باشد. قطر ذرات شن سیلیس ٤٤٠ میکرومتر و چگالی آن ٢٦٠٠ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. قطر ذرات پوسته برنج ١٥٤٠ میکرومتر و چگالی آن ٩٥٠/٦ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. هوا به‌عنوان عامل سیالیت از کف راکتور با سرعت یک‌نواخت ٠/٧٩ متر بر ثانیه وارد بستر می‌شود. بسترسیال ابتدا تا ارتفاع ٠/٢ متر با ذرات شن سیلیس و پوسته برنج به‌ترتیب با کسر حجمی ٠/٥١٣٣ و ٠/٠٨٦٧ پرشده‌است. باتوجه به این‌که رژیم جریان آرام می‌باشد و تغییرات شدید سرعت و پارامترهای دیگر در نزدیکی دیوارها وجود ندارد، لازم به ریزتر کردن و تغییرات اندازه شبکه در نزدیکی دیوارها مطرح نیست. حداقل اندازه شبکه لازم برای جریان آرام در نظر گرفته‌شده‌است. هرچند ریزتر کردن اندازه المان خود نیز می‌تواند خطای محاسباتی در پی داشته باشد. برای پرهیز از خطای محاسباتی در این پژوهش، اندازه شبکه یک‌نواخت و برابر ٠/٠٠٥ متر در نظر گرفته‌شده‌است. شکل (١- ب) نمونه شبکه محاسباتی بسترسیال حبابی موردمطالعه را نشان می‌دهد.

در ادامه، معادلات حاکم بر بسترسیال موردمطالعه قرار گرفته‌است. رویکرد مورداستفاده برای حل معادلات حاکم بر بسترسیال، رویکرد اویلرین می‌باشد



(ب) (الف)

شکل١ (الف) طرح‌واره اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در راکتور بسترسیالی حبابی،
(ب) نمونه شبکه محاسباتی بسترسیال حبابی
موردمطالعه

معادلات حاکم بر اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی

در این مطالعه از رویکرد اویلر- اویلری برای بررسی رفتار اختلاط زیست‌توده و ماده بستر استفاده شده‌است. فازهای گاز و جامد پیوسته در نظر گرفته شده‌اند و دائماً در هم نفوذ می‌کنند. در این رویکرد، معادلات بقای جرم و ممنتم برای هر فاز جداگانه حل می‌شوند.

کسر حجمی نشان‌دهنده میزان حجمی از فضا است که هر فاز اشـغال می‌کند. کسـر حجمی تابعی پیوسـته از فضـا و زمان اسـت. جمع کسـر حجمی فازها برابر با یک می‌باشـد. معادلات حاکم هر فاز به‌طور جداگانه بیان می‌شود [41,42].

$$\alpha_g + \alpha_r + \alpha_s = 1 \qquad (۱)$$

α_g کسر حجمی هوا، α_s کسر حجمی شن سیلیس و α_r کسر حجمی پوسته برنج می‌باشد.

معادلات بقای جرم

معادلات پیوسـتگی برای فاز گاز (هوا) و دو فاز جامد (پوسـته برنج و شن سیلیس) به شکل زیر بیان می‌شوند [43]:
برای فاز گاز (هوا):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g\rho_g) + \nabla.(\alpha_g\rho_g\vec{v}_g) = 0 \qquad (۲)$$

برای فاز جامد (شن سیلیس):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s) + \nabla.(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s) = 0 \qquad (۳)$$

برای فاز جامد (پوسته برنج):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_r\rho_r) + \nabla.(\alpha_r\rho_r\vec{v}_r) = 0 \qquad (٤)$$

$\vec{v}_g$ سـرعت فاز گاز (هوا)، ρ_g چگالی فاز گاز (هوا)، ρ_s چگالی شن سیلیس، $\vec{v}_s$ سرعت شن سیلیس، ρ_r چگالی پوسته برنج، $\vec{v}_r$ سرعت پوسته برنج می‌باشند.

معادلات ممنتم

معادلات ممنتم برای فاز گاز (هوا) و دو فاز جامد (پوسـته برنج و شن سیلیس) به شکل زیر بیان می‌شوند [44]:
معادله ممنتم برای فاز گاز (هوا)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g\rho_g) + \nabla.(\alpha_g\rho_g\vec{v}_g\vec{v}_g) = -\alpha_g\nabla P + \nabla.\bar{\tau}_g + \alpha_g\rho_g\vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) + K_{gr}(\vec{v}_g - \vec{v}_r) \qquad (۵)$$

معادله ممنتم برای فاز جامد (شن سیلیس)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s) + \nabla.(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s\vec{v}_s) = -\alpha_s\nabla P - \nabla P_s + \nabla.\bar{\tau}_s + \alpha_s\rho_s\vec{g} + K_{sg}(\vec{v}_s - \vec{v}_g) + K_{sr}(\vec{v}_s - \vec{v}_r) \qquad (٦)$$

معادله ممنتم برای فاز جامد (پوسته برنج)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_r\rho_r) + \nabla.(\alpha_r\rho_r\vec{v}_r\vec{v}_r) = -\alpha_r\nabla P - \nabla P_r + \nabla.\bar{\tau}_r + \alpha_r\rho_r\vec{g} + K_{rg}(\vec{v}_r - \vec{v}_g) + K_{rs}(\vec{v}_r - \vec{v}_s) \qquad (۷)$$

در عبارت فوق، P فشار مشترک بین دو فاز، $\bar{\tau}_g$ تانسور تنش فاز گاز (هوا)، $\bar{\tau}_s$ تانسور تنش شن سیلیس، $\vec{g}$ شتاب جاذبه زمین، K_{gs} ضـریب مبادله ممنتم بین فاز گاز (هوا) و شـن سـیلیس، K_{rs} ضـریب مبادله ممنتم بین پوسـته برنج و شـن سـیلیس، K_{gr} ضـریب مبادله ممنتم بین فاز گاز (هوا) و پوسـته برنج، P_s فشار شن سیلیس و P_r فشار پوسته برنج می‌باشند.

$$\bar{\bar{\tau}}_g = \alpha_g\mu_g(\nabla\vec{v}_g + \nabla\vec{v}_g^T) + \alpha_g\left(\lambda_g - \frac{2}{3}\mu_g\right)\nabla.\vec{v}_g\bar{\bar{I}} \qquad (۸)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_s = \alpha_s\mu_s(\nabla\vec{v}_s + \nabla\vec{v}_s^T) + \alpha_s\left(\lambda_s - \frac{2}{3}\mu_s\right)\nabla.\vec{v}_s\bar{\bar{I}} \qquad (۹)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_r = \alpha_r\mu_r(\nabla\vec{v}_r + \nabla\vec{v}_r^T) + \alpha_r\left(\lambda_r - \frac{2}{3}\mu_r\right)\nabla.\vec{v}_r\bar{\bar{I}} \qquad (۱۰)$$

λ_g ویسـکوزیته توده‌ای فاز گاز (هوا)، μ_g ویسـکوزیته برشـی فاز گاز (هوا)، λ_s ویسـکوزیته توده‌ای شـن سـیلیس، μ_s ویسکوزیته برشی شن سیلیس، λ_r ویسکوزیته توده‌ای پوسته برنج، μ_r ویسکوزیته برشی پوسته برنج می‌باشند.

مدل پسا گاز- جامد

مدل پسا بین فاز گاز و فازهای جامد شن سیلیس و پوسته برنج، مدل پسا گیدا سپاو [45] می‌باشد. این پسا از ترکیب مدل پسا ون-یو [46] و معادله ارگان [47] به‌دست می‌آید.
در این مدل اگر $\alpha_g > 0.8$ باشد، ضریب مبادله ممنتم بین

فاز گاز- شن سیلیس و فاز گاز- پو سته برنج را به شکل زیر می‌توان نوشت [45]:

$$K_{gs}=\frac{3}{4}C_D\frac{\alpha_s\alpha_g\rho_g\left|\vec{v}_s-\vec{v}_g\right|}{d_s}\alpha_g^{-2.65}K_{gs}=K_{sg} \quad (۱۱)$$

$$K_{gr}=\frac{3}{4}C_D\frac{\alpha_r\alpha_g\rho_g\left|\vec{v}_r-\vec{v}_g\right|}{d_r}\alpha_g^{-2.65}K_{gr}=K_{rg} \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق، C_D ضریب پسا، d_s قطر ذرات شن سیلیس و d_r قطر ذرات پوسته برنج می‌باشند [45].

که:

$$C_D=\frac{24}{\alpha_g Re_s}\left[1+0.15\left(\alpha_g Re_s\right)^{0.687}\right] \quad (۱۳)$$

$$C_D=\frac{24}{\alpha_g Re_r}\left[1+0.15(\alpha_g Re_r)^{0.687}\right] \quad (۱٤)$$

که در رابطه بالا عدد رینولدز فاز جامد به شـــکل زیر تعریف می‌شود [48]:

$$Re_s=\frac{\rho_g d_s\left|\vec{v}_s-\vec{v}_g\right|}{\mu_g} \quad (۱۵)$$

$$Re_r=\frac{\rho_g d_r\left|\vec{v}_r-\vec{v}_g\right|}{\mu_g} \quad (۱٦)$$

با توجه به معادله ذکرشده در رابطه (۱۵) و (۱٦)، عدد رینولدز برای ذرات شن سیلیس و پوسته برنج به‌ترتیب ۲۳/۵۲ و ۸۲/۳۳ محاسبه شده‌است. با توجه به این‌که عدد رینولدز محاسبه‌شده برای ذرات جامد بسیار پایین می‌باشد، لذا جریان در راکتور آرام می‌باشد.

هم‌چنین اگر $\alpha_g < 0.8$ با شد، ضریب مبادله ممنتم بین فاز گاز- شـــن ســـیلیس و فاز گاز-پوســـته برنج به شـــکل زیر بیان می‌شود [45]:

$$K_{gs}=150\frac{\alpha_s\mu_g\left(1-\alpha_g\right)}{\alpha_g d_s^{\,2}}+1.75\frac{\rho_g\alpha_s\left|\vec{v}_s-\vec{v}_g\right|}{d_s}K_{gs}=K_{sg} \quad (۱۷)$$

$$K_{gr}=150\frac{\alpha_r\mu_g\left(1-\alpha_g\right)}{\alpha_g d_r^{\,2}}+1.75\frac{\rho_g\alpha_r\left|\vec{v}_r-\vec{v}_g\right|}{d_r}K_{gr}=K_{rg} \quad (۱۸)$$

مدل پسا جامد- جامد

مدل پسا بین فازهای جامد، مدل پسا شملال- ابراین سیمتریک می‌باشد [49].

$$K_{rs}=\frac{3(1+e_{rs})\left(\frac{\pi}{2}+C_{fr,rs}\frac{\pi^2}{8}\right)\alpha_s\rho_s\alpha_r\rho_r(d_r+d_s)^2 g_{0,rs}}{2\pi\left(\rho_r d_r^{\,3}+\rho_s d_s^{\,3}\right)}(\vec{v}_r-\vec{v}_s) \quad (۱۹)$$

در عبارت فوق، $C_{fr,rs}$ ضریب اصطکاک بین ذرات پو سته برنج و شن سیلیس، e_{rs} ضریب برخورد بین ذرات پوسته برنج و شن سیلیس و $g_{0,rs}$ تابع توزیع شعاعی می‌باشد.

فشار جامد

فشـــار جامد در معادله انتقال ممنتم فاز جامد به‌صـــورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_s=\alpha_s\rho_s\theta_s+2\rho_s(1+e_{ss})\alpha_s^{\,2}g_{0,ss}\theta_s \quad (۲۰)$$

در رابطه فوق، e_{ss} ضریب برخورد بین ذرات جامد، وقتی این ضریب برابر با یک باشد برخورد به‌طور کامل الاستیک است ولی وقتی این ضریب برابر با صفر باشد برخورد پلاستیک است و θ_s دمای دانه‌ای متناسب با انرژی جنبشی نوسانی حرکت ذرات است.

معادله (۲۰) برای محا سبه فشار فازهای جامد پو سته برنج و شن سیلیس به‌صورت زیر بیان می‌شود [43]:

$$P_s=\alpha_s\rho_s\theta_s+2\frac{d_s^3}{d_s^3}\rho_s(1+e_{ss})\alpha_s\alpha_s g_{0,ss}\theta_s +2\frac{d_{rs}^3}{d_s^3}\rho_s(1+e_{rs})\alpha_s\alpha_s g_{0,sr}\theta_s \quad (۲۱)$$

$$P_r=\alpha_r\rho_r\theta_r+2\frac{d_r^3}{d_r^3}\rho_s(1+e_{rr})\alpha_r\alpha_r g_{0,rr}\theta_r +2\frac{d_{rs}^3}{d_r^3}\rho_r(1+e_{rs})\alpha_r\alpha_r g_{0,rs}\theta_r \quad (۲۲)$$

در رابطه بالا $d_{rs}=\frac{d_r+d_s}{2}$، $e_{rs}=\frac{e_r+e_s}{2}$، θ_s د مای دا نه‌ای ذرات شن سیلیس و θ_r دمای دانه‌ای ذرات پوسته برنج می‌باشد.

تابع توزیع شعاعی

این تابع زمانی که فازهای جامد دانه‌ای باشند، احتمال برخورد بین ذرات را تصحیح می‌کند [50].

$$g_{0,sr}=\left[1-\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1}+\frac{1}{2}d_s\left(\frac{\alpha_s}{d_s}+\frac{\alpha_r}{d_r}\right) \quad (۲۳)$$

$$g_{0,rs}=\left[1-\left(\frac{\alpha_r}{\alpha_{r,max}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1}+\frac{1}{2}d_r\left(\frac{\alpha_r}{d_r}+\frac{\alpha_s}{d_s}\right) \quad (۲٤)$$

در رابطه بالا، $\alpha_{s,max}=0.63$ و $\alpha_{r,max}=0.63$

تنش برشی جامد

تانسور تنش ذرات جامد شن سیلیس و پوسته برنج براثر تبادل ممنتم بین ذرات براثر چرخش یا برخورد ذرات به‌وجود می‌آید. تانسور تنش ذرات جامد شن سیلیس و پوسته برنج شامل لزجت برشی و لزجت توده‌ای می‌باشد. لزجت برشی نیز شامل لزجت برخورد و لزجت جنبشی ذرات می‌باشد.

$$\mu_r=\mu_{r,col}+\mu_{r,kin} \quad (۲۵)$$

$$\mu_s=\mu_{s,col}+\mu_{s,kin} \quad (۲٦)$$

لزجت برخورد پوسته برنج و شن سیلیس. لزجت برخورد ذرات پوسته برنج و شن سیلیس توسط رابطه‌های زیر بیان می‌شوند [45,51]:

$$\mu_{r,col}=\frac{4}{5}\alpha_r\rho_r d_r g_{0,rr}(1+e_{rr})\left(\frac{\theta_r}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\alpha_r \quad (۲۷)$$

$$\mu_{s,col}=\frac{4}{5}\alpha_s\rho_s d_s g_{0,ss}(1+e_{ss})\left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\alpha_s \quad (۲۸)$$

لزجت جنبشی پوسته برنج و شن سیلیس. لزجت جنبشی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس توسط رابطه‌های زیر بیان می‌شوند [51]:

$$\mu_{r,kin}=\frac{\alpha_r\rho_r d_r(\theta_r\pi)^{\frac{1}{2}}}{6(3-e_{rr})}\left[1+\frac{2}{5}(1+e_{rr})(3e_{rr}-1)\alpha_r g_{0,rr}\right] \quad (۲۹)$$

$$\mu_{s,kin}=\frac{\alpha_s\rho_s d_s(\theta_s\pi)^{\frac{1}{2}}}{6(3-e_{ss})}\left[1+\frac{2}{5}(1+e_{ss})(3e_{ss}-1)\alpha_s g_{0,ss}\right] \quad (۳۰)$$

لزجت توده‌ای ذرات پوسته برنج و شن سیلیس

لزجت توده‌ای نشان‌دهنده مقاومت ذرات جامد دانه‌ای پوسته برنج و شن سیلیس در برابر انقباض و انبساط می‌باشد [52]:

$$\Lambda_r=\frac{4}{3}\alpha_r\rho_r d_r g_{0,rr}(1+e_{rr})\left(\frac{\theta_r}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (۳۱)$$

$$\lambda_s=\frac{4}{3}\alpha_s\rho_s d_s g_{0,ss}(1+e_{ss})\left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (۳۲)$$

دمای دانه‌ای ذرات پوسته برنج و شن سیلیس

دمای دانه‌ای ذرات جامد پوسته برنج و شن سیلیس با انرژی جنبشی ذرات رابطه دارند. معادله انتقال از تئوری جنبشی به دست می‌آید و به شکل زیر بیان می‌شود [44]:

$$\frac{3}{2}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_r\rho_r\theta_r)+\nabla.(\alpha_r\rho_r\vec{v}_r\theta_r)\right]=\left(-P_r\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}_r\right):\nabla\vec{v}_r+\nabla.\left(k_{\theta_r}\nabla\theta_r\right)-\gamma\theta_r+\varphi_{lr} \quad (۳۳)$$

$$\frac{3}{2}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s\theta_s)+\nabla.(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s\theta_s)\right]=\left(-P_s\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}_s\right):\nabla\vec{v}_s+\nabla.\left(k_{\theta_s}\nabla\theta_s\right)-\gamma\theta_s+\varphi_{ls} \quad (۳٤)$$

در رابطه فوق، $\left(-P_s\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}_s\right):\nabla\vec{v}_s$ انرژی تولیدی توسط تانسور تنش شن سیلیس، $k_{\theta_s}\nabla\theta_s$ نفوذ شن سیلیس، $\gamma\theta_s$ اضمحلال انرژی ناشی از برخورد ذرات شن سیلیس، φ_{ls} مبادله انرژی بین هوا و شن سیلیس، $\left(-P_r\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}_r\right):\nabla\vec{v}_r$ انرژی تولیدی توسط تانسور تنش پوسته برنج، $k_{\theta_r}\nabla\theta_r$ نفوذ پوسته برنج، $\gamma\theta_r$ اضمحلال انرژی ناشی از برخورد ذرات پوسته برنج، φ_{lr} مبادله انرژی بین هوا و پوسته برنج می‌باشند.

برای بستر سیال آرام و متراکم می‌توان از جمله‌های نفوذ و جابه‌جایی صرف‌نظر کرد [51]:

$$\left(-P_r\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}_r\right):\nabla\vec{v}_r-\gamma\theta_r+\varphi_{gr}=0 \quad (۳۵)$$

$$\left(-P_s\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}_s\right):\nabla\vec{v}_s-\gamma\theta_s+\varphi_{gs}=0 \quad (۳٦)$$

هم‌چنین دو جمله سمت راست معادله بالا را می‌توان به شکل زیر نوشت [45,52]:

$$\gamma\theta_r=\frac{12(1-{e_{rr}}^2)g_{0,rr}}{d_r\pi^{\frac{1}{2}}}{\alpha_r}^2\rho_r{\theta_r}^{\frac{3}{2}} \quad (۳۷)$$

$$\gamma\theta_s = \frac{12(1-{e_{ss}}^2)g_{0,ss}}{d_s\pi^{\frac{1}{2}}}{\alpha_s}^2\rho_s{\theta_s}^{\frac{3}{2}} \quad (۳۸)$$

$$\varphi_{gr} = -3K_{lr}\theta_r \quad (۳۹)$$

$$\varphi_{gs} = -3K_{ls}\theta_s \quad (۴۰)$$

شرایط مرزی اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی

در مرز ورودی راکتور بســترســیال، هوا بدون ذرات با ســرعت یک‌نواخت ۰/۷۹ متر بر ثانیه، از کف راکتور وارد بستر می شود و بنابراین در ورودی، کسر حجمی فازهای جامد پوسته برنج و شن سیلیس برابر با صفر می‌باشند. در دیوارها برای فاز گاز از شــرط مرزی بدون لغزش و برای فازهای جامد از شــرط مرزی لغزش جانسون و جکسون [53] استفاده شده‌است که رابطه آن را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$v_{sw} = -A\frac{\partial v_{sw}}{\partial n} \quad (۴۱)$$

$$v_{rw} = -A\frac{\partial v_{rw}}{\partial n} \quad (۴۲)$$

ضــریب لغزش A به‌صــورت جمله‌ای از ضــریب برخورد آیینه‌ای به شکل زیر تعریف می‌شود:

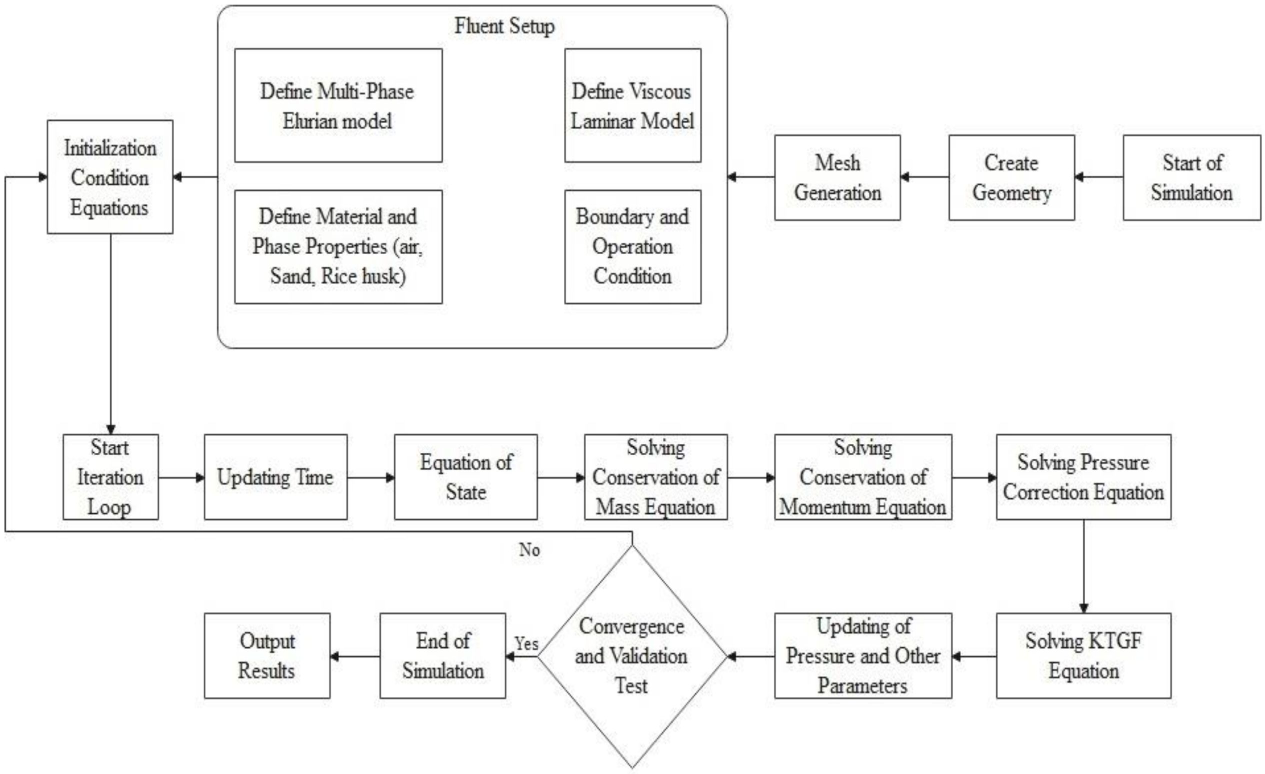
$$A = \frac{6\mu_r\alpha_{r,max}}{\sqrt{3}\pi\varphi\rho_r\varepsilon_r g_{0,rr}\sqrt{\theta_r}} \quad (۴۳)$$

$$A = \frac{6\mu_s\alpha_{s,max}}{\sqrt{3}\pi\varphi\rho_s\varepsilon_s g_{0,ss}\sqrt{\theta_s}} \quad (۴۴)$$

در خروجی راکتور از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده‌است. نیروی‌های بین سه فاز گاز، پوسته برنج و شن سیلیس شامل نیروهای پسا، برا و نیروی جرم مجازی می‌باشند. در بسیاری از مقالات، اشاره شده‌است که نیروی برا برای ذرات با قطر بزرگ غالب می‌باشد؛ اما هنگامی‌که قطر ذرات بسیار کوچک‌تر از فاصله بین ذرات باشد، در نظر گرفتن نیروی برا مناسب نیست؛ بنابراین از اثر نیروی برا برای بسترسیال پرشده با ذرات بسیار کوچک صرف‌نظر می‌شود. هم‌چنین در مقالات اشاره شده‌است که با توجه به این‌که در بسترسیال حبابی ذرات جامد با یکدیگر برخورد/ تماس پیدا می‌کنند و مسیر آزاد یک‌ذره‌ی بسیار کوتاه است، از اثر نیرو برا صرف‌نظر می‌شود [43, 54-56]. هم‌چنین با توجه به این‌که چگالی فاز جامد بسیار بزرگ‌تر از چگالی فاز گاز می‌باشد از نیروی جرم مجازی نیز صرف‌نظر شده‌است [43,56]؛ بنابراین تنها نیروی تأثیرگذار بین دو فاز که نقش مهمی را ایفا می‌کند نیروی پسا می‌باشد.

روش حل معادلات حاکم بر اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی

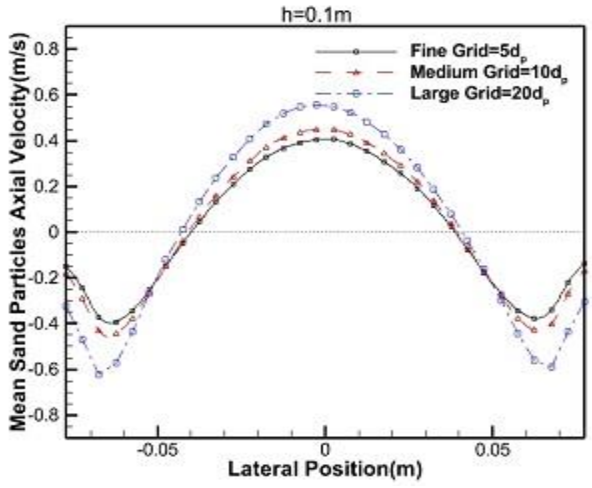
در پژوهش حاضر، معادلات حاکم بررویکرد جریان چند فازی اویلرین به‌همراه تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای ذرات جامد در جریان هوای آرام بااستفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به‌روش حجم محدود به‌کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۷/۲ حل‌شده‌است. در نرم‌افزار انسیس فلوئنت، معادلات رویکرد جریان چند فازی اویلرین مثل معادلات ممنتم، فشار مشترک و معادلات کسر حجمی فازهای مختلف به‌صورت هم‌بسته و تفکیک‌شده حل می‌شوند. هنگامی‌که معادلات به‌صورت تفکیک‌شده حل شوند، نرم‌افزار انسیس فلوئنت از الگوریتم Phase Coupled SIMPLE (PC-SIMPLE) برای هم‌بسته کردن فشار- سرعت استفاده می‌کند. الگوریتم PC-SIMPLE شکل توسعه‌یافته الگوریتم SIMPLE برای رویکرد جریان‌های چند فازی می‌باشد. در این پژوهش برای گسسته‌سازی ترم مشتق زمانی جریان ناپایا از مرتبه دوم ضمنی در نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده‌است. هم‌چنین برای گسسته‌سازی کسر حجمی و ممنتم، بالادست مرتبه دوم به‌کاربرده شده‌است. مدت‌زمان شبیه‌سازی ۳۰ ثانیه و مدت‌زمان متوسط‌گیری در این پژوهش ۲۵ ثانیه (ثانیه ۵ تا ثانیه ۳۰) می‌باشد. در این تحقیق برای هم‌گرایی و پایداری بهتر از گام زمانی ۰/۰۰۰۱ استفاده شده‌است. حداکثر تعداد تکرار در هر گام زمانی برروی عدد ۲۰۰ تکرار تنظیم شده‌است. معیار هم‌گرایی برای حداکثر باقی‌مانده‌ها بین دو تکرار روی ۰/۰۰۱ تنظیم شده‌است. تمام شبیه‌سازی‌های این پژوهش در حالت موازی با پردازنده هشت هسته‌ای اینتل زئون ایکس ۵۵۷۰ با فرکانس ۲/۹۳ گیگاهرتز و با رم ۸ گیگ انجام شده‌است. برای نمونه مدت‌زمان بررسی اثر ضریب برخورد آیینه‌ای حالت بدون لغزش برروی رفتار اختلاط بسترسیال با سیستم ذکرشده حدود ۷۲ ساعت و ۰۹ دقیقه به طول انجامید. هم‌چنین الگوریتم حل مسئله در شکل زیر نشان داده شده‌است.



شکل ۲ الگوریتم حل مسئله حاضر

مطالعه استقلال از شبکه

در جهت مطالعه استقلال از شبکه، از سه شبکه با اندازه‌های مختلف استفاده شده‌است. یک شبکه درشت با اندازه ۲۰ برابر قطر ذره، یک شبکه متوسط با اندازه ۱۰ برابر قطر ذره و یک شبکه ریز با اندازه ۵ برابر قطر ذره موردمطالعه قرارگرفته‌است. متوسط سرعت ذرات جامد در ارتفاع ۰/۱ متر نسبت‌به کف بستر برای سه شبکه در شکل (۳) رسم شده‌است. شکل (۳) نشان می‌دهد، میزان اختلاف متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در دو شبکه ریز و درشت حدود ۳۸/۷٪ می‌باشد. درحالی‌که با ریزتر کردن شبکه و استفاده از شبکه محاسباتی متوسط، این اختلاف به کمتر از ۸٪ می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف قابل‌توجهی بین دو شبکه ریز و متوسط موردمطالعه وجود ندارد؛ بنابراین در این پژوهش از شبکه متوسط با اندازه ۱۰ برابر قطر ذره استفاده می‌شود. هم‌چنین بسیاری از محققان از اندازه شبکه مشابهی در پژوهش‌های مرتبط با بسترسیال استفاده کرده‌اند [29,32].



شکل ۳ متوسط سرعت محوری ذرات شن سیلیس در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱ متر نسبت‌به کف بستر برای سه شبکه مختلف موردمطالعه

اعتبارسنجی پژوهش

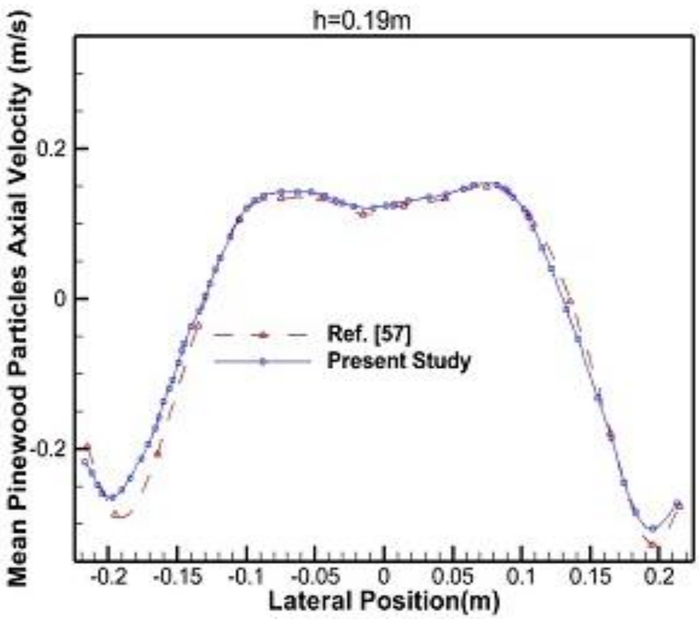
پیش از پرداختن به مطالعه اثر ضریب برخورد آیینه‌ای و ضریب برخورد ذرات با یکدیگر برروی هند سه و شرایط موردمطالعه،

لازم است نسبت‌به کارهای قبلی اعتبارسنجی انجام شود. جدول (۱) اعداد انتخاب شده برای ضریب برخورد آیینه‌ای و ضریب برخورد بین ذرات پژوهش های مشـــابه (تجربی و عددی) را نشان می‌دهد.

بدین منظور به مقایسه و اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر با نتایج حل عددی اختلاط ذرات چوب کاج و زغال زیستی شارما و همکاران [57] پرداخته شد. ارتفاع راکتور بسترسیال ۲ متر و عرض آن ۰/۴۵ متر است. سرعت هوای ورودی ۰/۷۹ متر بر ثانیه، قطر و چگالی ذرات چوب کاج به‌ترتیب ۱/۵۴ میلی‌متر و ۵۸٤ کیلوگرم بر مترمکعب، قطر و چگالی ذرات زغال زیستی به‌ترتیب ۱ میلی‌متر و ۱٤۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. ضریب برخورد بین ذرات چوب کاج ۰/٦ و ضریب برخورد بین ذرات زغال زیستی ۰/۹ می‌باشد. هم‌چنین کسر حجمی ذرات چوب کاج و زغال زیستی به‌ترتیب ۰/۰۸۱ و ۰/۵۱۹ می‌باشد. در شکل (٤)، جهت اعتبارسنجی این مطالعه، متوسط سرعت ذرات چوب کاج در ارتفاع ۰/۱۹ متر نسبت‌به کف بستر با نتایج پژوهش [57] مورد مقایسه قرار گرفته‌است.

جدول ۱ ضریب برخورد آیینه‌ای و ضریب برخورد بین ذرات مطالعات پیشین

محققان	ضریب برخورد آیینه‌ای	ضریب برخورد ذرات شن سیلیس	ضریب برخورد ذرات پوسته برنج
ژی و مونرو [58]	لغزش جزیی	۰/۹۸ تا ۰/۹	–
احمد و همکاران [59]	لغزش جزیی	۰/۹	–
پرواساننی و بووا [60]	لغزش جزیی	۰/۹	–
حمید و همکاران [9]	لغزش جزیی	۰/۹۷	–
عبدالمطلب [37]	لغزش جزیی	۰/۹۸ تا ۰/۸۵	–
شارما و همکاران [57]	لغزش جزیی	۰/۹	۰/٦
کیاکویین و همکاران [7]	لغزش جزیی	۰/۹	۰/٦
گورین و همکاران [61]	لغزش جزیی	۰/۹	–
وانگ و همکاران [62]	لغزش جزیی	۰/۹	۰/٦



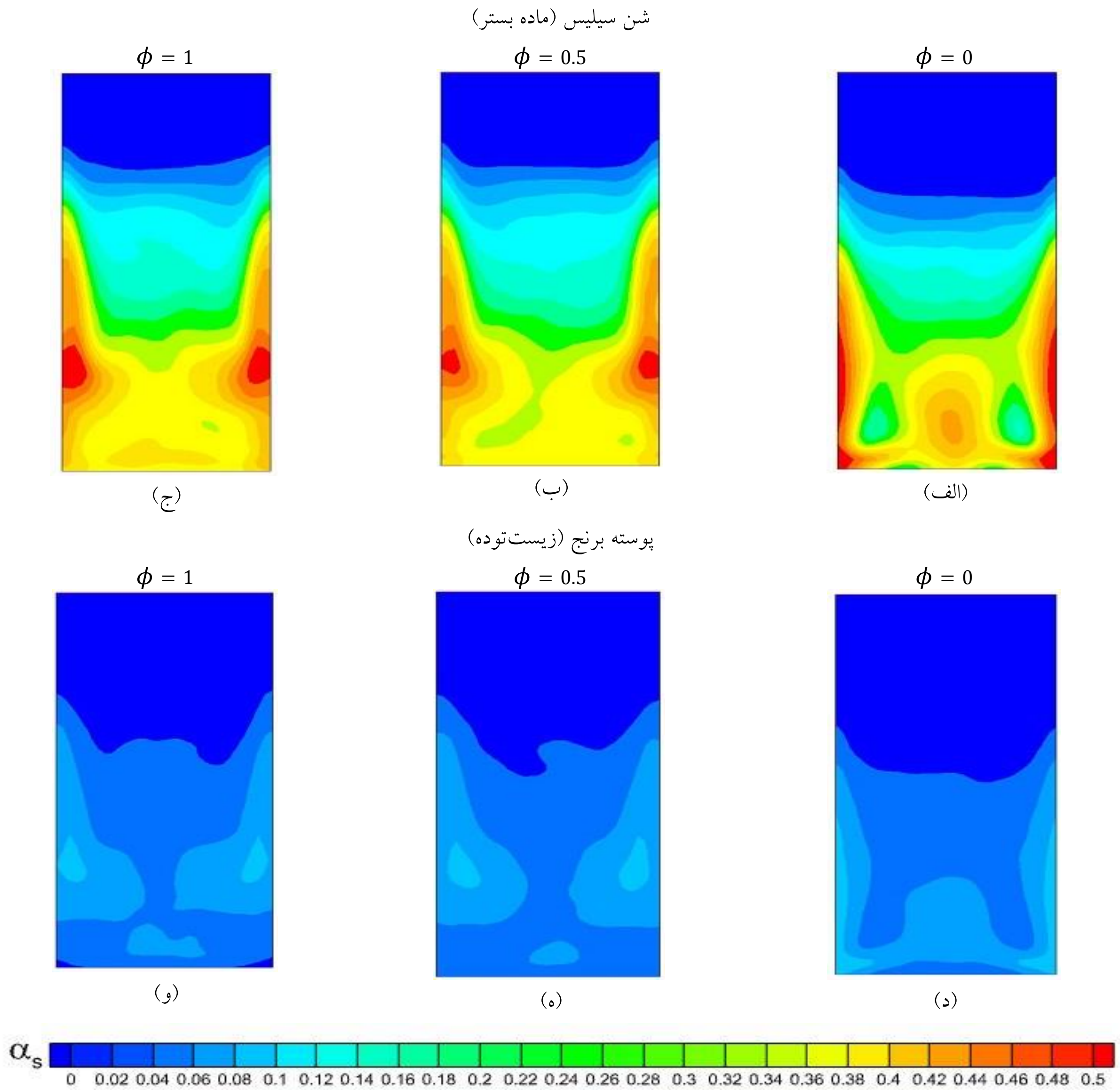
شکل ٤ متوسط سرعت محوری ذرات چوب کاج در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۹ متر نسبت‌به کف بستر

نتایج مطالعه اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی

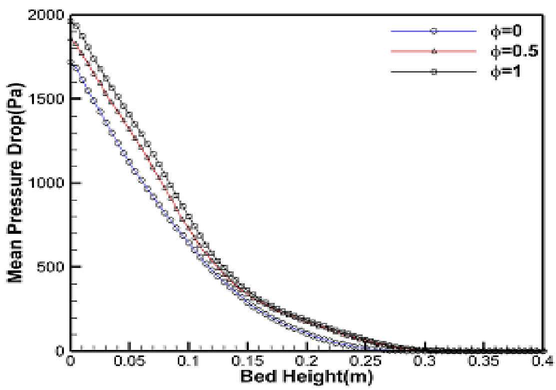
بررسی اثر ضریب برخورد آیینه‌ای برروی رفتار اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی. بخش اول این پژوهش به بررسی اثر ضریب برخورد آیینه‌ای برروی رفتار هیدرودینامیک اختلاط پوسته برنج (زیست‌توده) و شن سیلیس (ماده بستر) در بسترسیال حبابی می‌پردازد. ضریب برخورد آیینه‌ای برای جریان‌های دانه‌ای تعیین‌کننده کسری از برخورد می‌باشد که باعث انتقال ممنتم به دیوارها می‌شود. محدوده مقدار ضریب برخورد آیینه‌ای از ۰ تا ۱ می‌باشد. سه ضریب برخورد آیینه‌ای، لغزش آزاد ($\emptyset = 0$)، لغزش جزئی ($\emptyset = 0.5$) و بدون لغزش ($\emptyset = 1$) بدون تغییر پارامترهای دیگر بررسی شده‌است. در این بررسی سرعت ورودی هوا، کسر حجمی و چگالی ذرات ثابت فرض شده‌است. هم‌چنین ضرایب برخورد بین ذرات شن- شن، پوسته برنج- پوسته برنج و پوسته برنج- شن به‌ترتیب ۰/۹، ۰/٦ و ۰/٦ در نظر گرفته شده‌است.

بررسی اثر ضریب برخورد آیینه‌ای برروی توزیع کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس. شکل (۵) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی پوسته برنج و شن سیلیس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، بیشترین کسر حجمی در نزدیکی دیوارها و مرکز بستر اتفاق می‌افتد؛ به این دلیل که سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در نزدیکی دیوارها کم می‌باشد. هم‌چنین عامل بالا بردن ذرات که نیروی پسا در راکتور بسترسیال می‌باشد در مرکز بستر زیاد و در نزدیکی دیوارها پایین می‌باشد، لذا با کاهش سرعت ذرات و پایین بودن نیروی پسا، تجمع ذرات در دیوارها افزایش می‌یابد و با افزایش تجمع ذرات در دیوارها، کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در دیوارها افزایش می‌یابد. توزیع رنگی کسر حجمی پوسته برنج و شن سیلیس نشان می‌دهد اکثر حباب‌ها در ناحیه بین دیوارها و مرکز بستر شکل می‌گیرند. هم‌چنین کاهش کسر حجمی در بالای بستر نشان‌دهنده از بین رفتن حباب‌ها می‌باشد. کسر حجمی ذرات در نزدیکی دیوارها به حداکثر مقدار مجاز خود می‌رسند. درحالی‌که در مرکز بستر کسر حجمی ذرات کاهش می‌یابد. این رفتار به‌دلیل سرعت نسبتاً بالای هوای ورودی به بستر و سرعت پایین هوا در دیوارها اتفاق می‌افتد. هم‌چنین مشاهده می‌شود در شرایط لغزش آزاد ($\emptyset = 0$) کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در دیوارها و مرکز بستر نسبت‌به دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد. هم‌چنین با گذشت زمان، ذرات پوسته برنج و شن سیلیس به‌دلیل نیروی گرانش، تمایلشان به رسوب و چسبندگی به کف بستر افزایش می‌یابد و لذا کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در کف بستر بیشتر می‌باشد.

بررسی اثر ضریب برخورد آیینه‌ای برروی افت فشار بسترسیال. در طراحی سیستم‌های بسترسیال، افت فشار یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار می‌باشد. شکل (٦) افت فشار بسترسیال با ضرایب برخورد آیینه‌ای لغزش آزاد ($\emptyset = 0$)، لغزش جزئی ($\emptyset = 0.5$) و بدون لغزش ($\emptyset = 1$) را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند کمترین افت فشار در شرایط لغزش آزاد ($\emptyset = 0$) رخ می‌دهد. در شرایط لغزش آزاد، افت فشار به‌ترتیب ۸/۰۹٪ و ۱٤/۲٪ نسبت‌به دو حالت لغزش جزیی و بدون لغزش کمتر می‌باشد. در لغزش آزاد ($\emptyset = 0$) ذرات آزادانه در امتداد دیوار حرکت می‌کنند و تنش برشی میان ذرات و دیوار صفر است. ولی در شرایط بدون لغزش ($\emptyset = 1$) ذرات به دیواره می‌چسبند و در این حالت مقدار تنش برشی بیشینه است؛ بنابراین با افزایش ضریب برخورد آیینه‌ای تنش برشی افزایش می‌یابد و با افزایش تنش برشی افت فشار نیز افزایش می‌یابد. برای رسیدن به شرایط مطلوب در طراحی راکتور بسترسیال حبابی باید افت فشار کاهش یابد. در این صورت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس به‌خوبی مخلوط می‌شوند و توزیع هم‌گونی میان ذرات پوسته برنج و شن سیلیس رخ می‌دهد و درنتیجه کیفیت گازهای سنتز شده خروجی از راکتور گازی ساز بسترسیال حبابی افزایش می‌یابد.

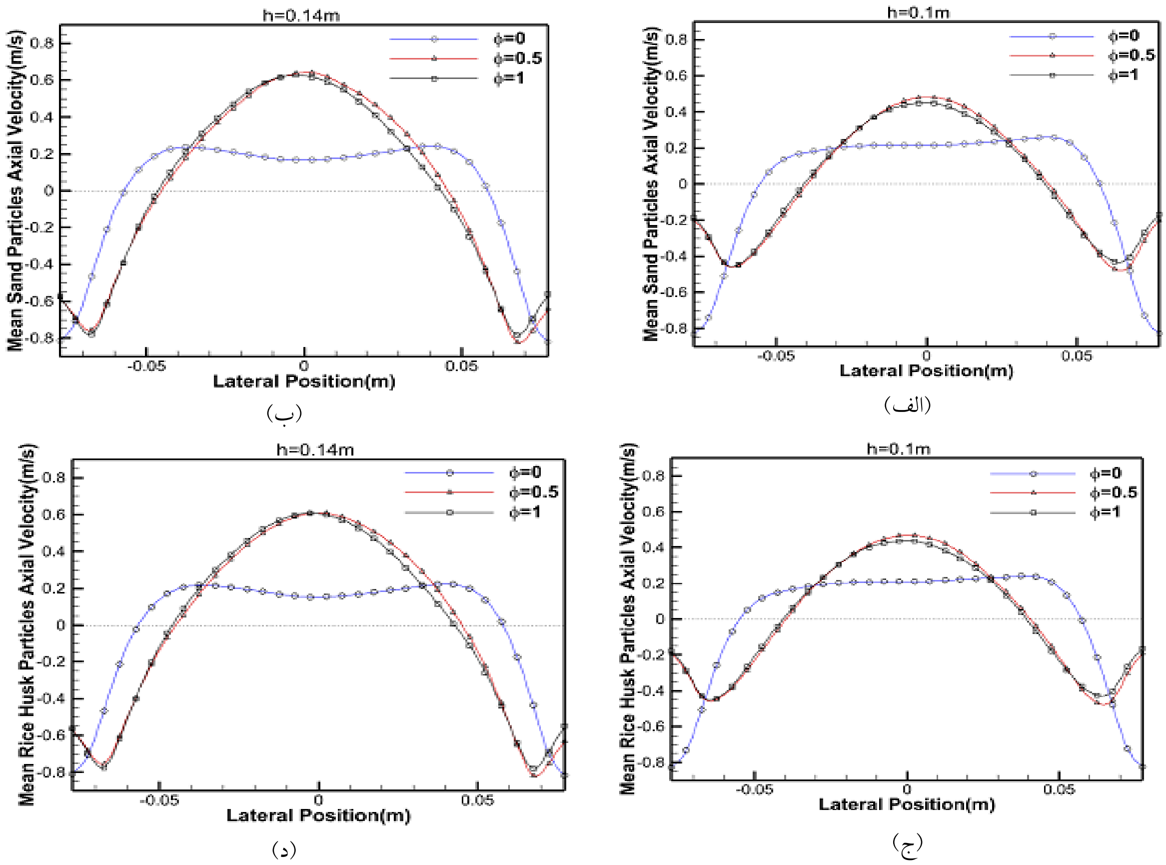


شکل ۵ (الف) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد، (ب) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط لغزش جزیی، (ج) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط بدون لغزش، (د) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط لغزش آزاد، (ه) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط لغزش جزیی، (و) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط بدون لغزش



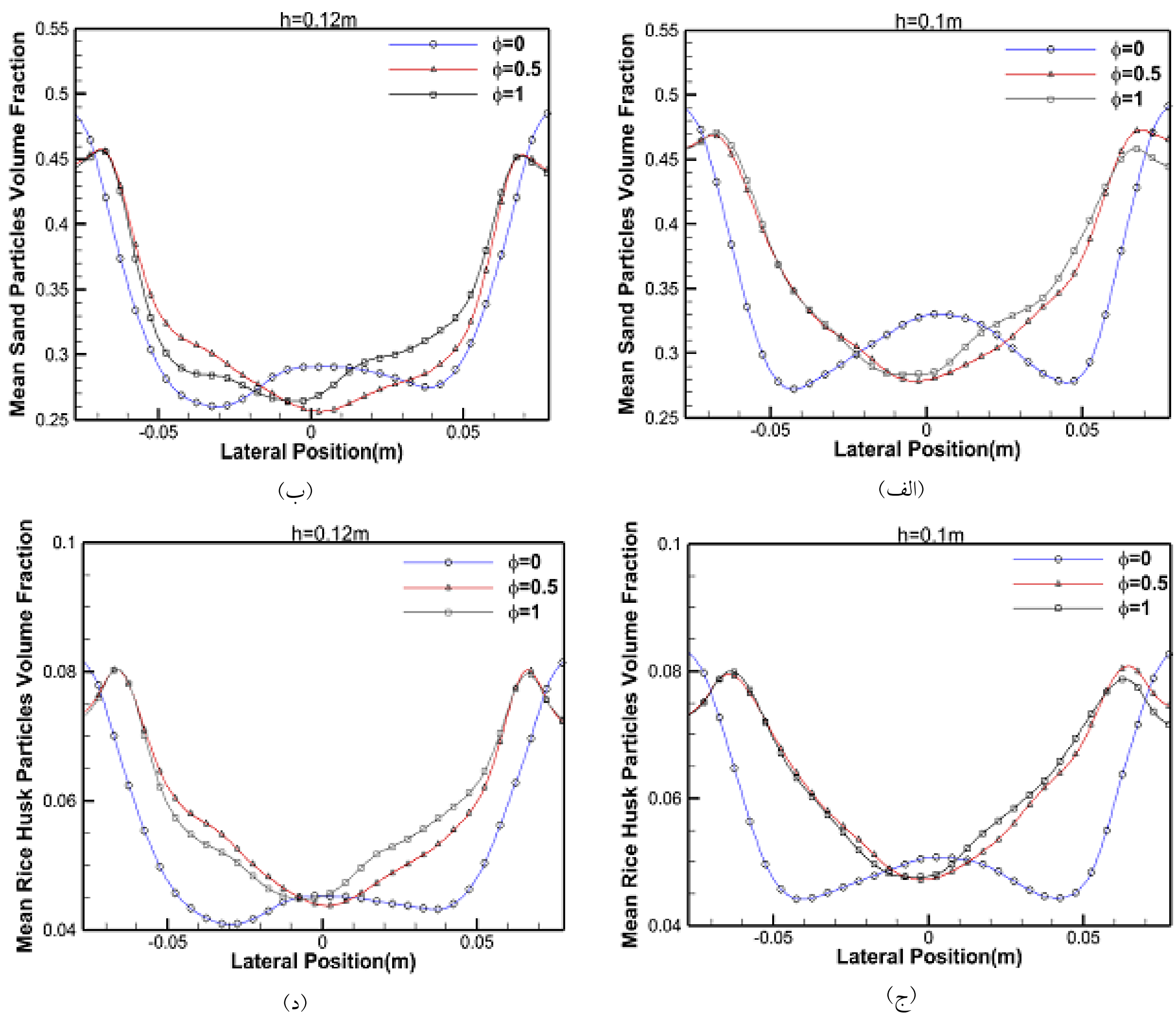
شکل ٦ اثر ضریب برخورد آیینه‌ای برروی افت فشار در طول امتداد بسترسیال

بررسی اثر ضریب برخورد آینه‌ای برروی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بسترسیال. معیار اختلاط شیب منحنی تغییرات سرعت و گرادیان سرعت می‌باشد. هر چه گرادیان سرعت افزایش یابد، اختلاط و مخلوط شدن بهتر انجام می‌شود. شکل (۷) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس را در ارتفاع‌های ۰/۱ متر و ۰/۱۴ متر نسبت‌به کف بستر نشان می‌دهد. در مرکز بستر، ذرات پوسته برنج و شن سیلیس به‌وسیله هوا حمل می‌شوند و به‌سمت بالا حرکت می‌کنند و در دیوارهای بستر به‌سمت پایین حرکت می‌کنند، لذا در این حالت در بسترسیال جریان برگشتی رخ می‌دهد. این رفتار به‌جز در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ اتفاق می‌افتد. پروفیل توزیع متوسط سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ در مرکز و دیوارهای بستر نسبت‌به دو حالت بدون لغزش $(\emptyset = 1)$ و لغزش جزئی $(\emptyset = 0.5)$ متفاوت می‌باشد. با کاهش ضریب برخورد آینه‌ای، اصطکاک میان ذرات و دیواره کاهش می‌یابد؛ بنابراین با کاهش ضریب برخورد آینه‌ای، سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد، بیشترین سرعت رو به پایین (سرعت منفی) در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ و کمترین سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات جامد در شرایط بدون لغزش $(\emptyset = 1)$ اتفاق می‌افتد. در مرکز بستر، حداکثر سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش جزئی $(\emptyset = 0.5)$ پیش‌بینی می‌شود. هم‌چنین هر چه به کف بستر نزدیک‌تر شویم، متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود در شرایط $(\emptyset = 0)$ تغییرات شدید سرعت در نواحی مرکز بستر وجود ندارد. شیب تغییرات سرعت در این حالت نسبت‌به دو حالت دیگر کمتر می‌باشد؛ بنابراین در این حالت اختلاط مناسبی انجام نمی‌شود. لذا هر چه شیب تغییرات سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بستر افزایش یابد، تجمع ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال کاهش می‌یابد، بنابراین اختلاط بهتری میان ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بستر انجام می‌شود.



شکل ۷ الف) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱ متر، ب) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱۴ متر، ج) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱ متر، د) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱۴ متر

بررسی اثر ضریب برخورد آینه‌ای برروی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بسترسیال. شکل (۸) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس را در ارتفاع‌های ۰/۱ متر و ۰/۱۲ متر نسبت‌به کف بستر نشان می‌دهد. پروفیل توزیع کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ نسبت‌به دو حالت دیگر متفاوت می‌باشد. به این دلیل که ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ به‌راحتی در امتداد دیوارها به‌سمت پایین حرکت می‌کنند و دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) بیشتری می‌باشند، لذا کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در حوالی دیوارها در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ نسبت‌به دو شرط مرزی دیگر بیشتر می‌باشد. هم‌چنین بیشترین توزیع کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در مرکز بستر در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ پیش‌بینی می‌شود. با افزایش تجمع ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال، تمایل ذرات به تفکیک و جدایش افزایش می‌یابد، بنابراین اختلاط ذرات به‌خوبی انجام نمی‌شود و ذرات به‌صورت یکپارچه مخلوط نمی‌شوند. هم‌چنین مشاهده می‌شود به‌دلیل تجمع بیشتر ذرات جامد در دیوارهای بستر در مقایسه با مرکز بستر، کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در دیوارهای بستر بیشتر می‌باشد.



شکل ۸ (الف) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱ متر، (ب) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱۲ متر، (ج) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱ متر، (د) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱۲ متر

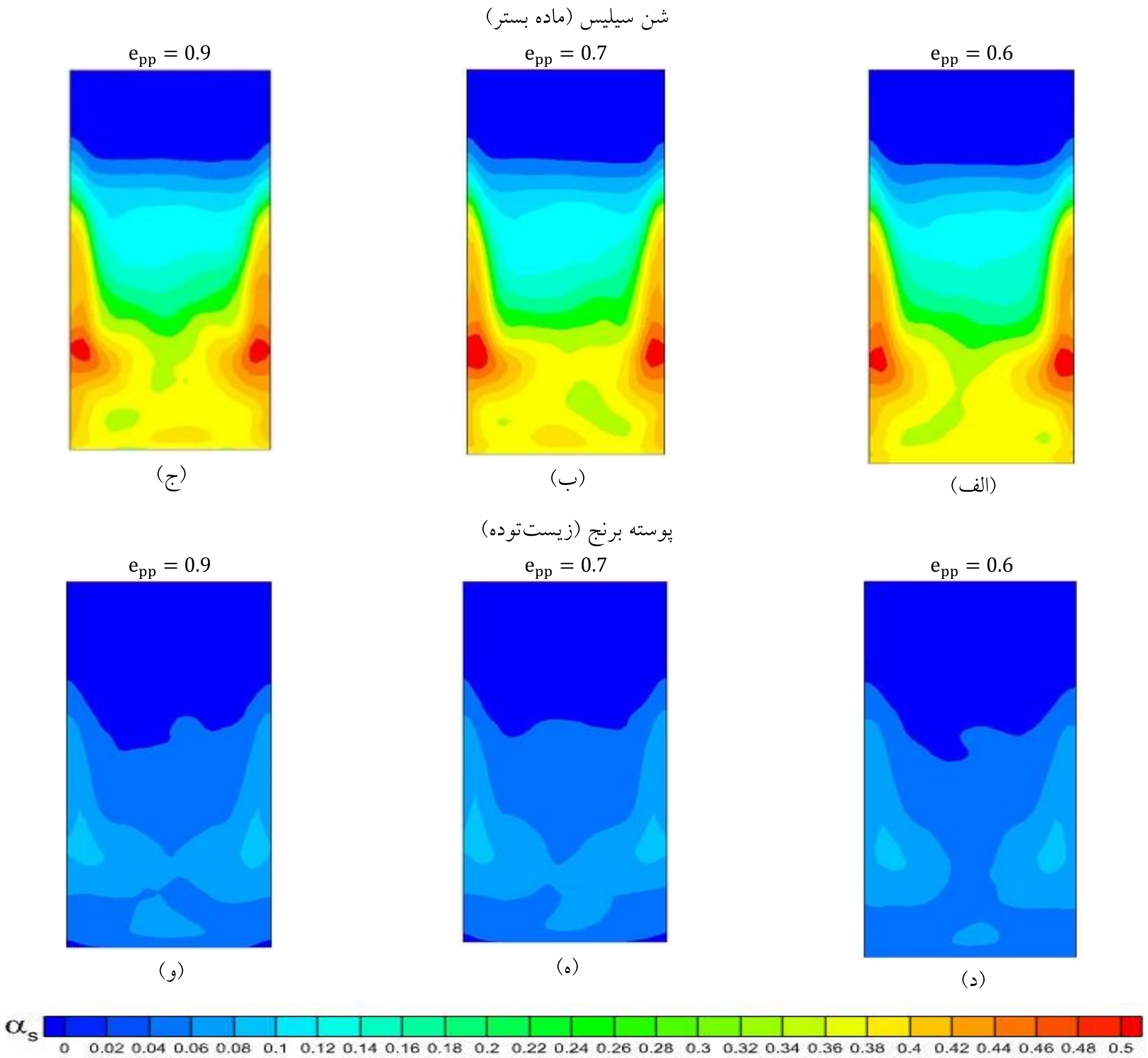
بررسی اثر ضریب برخورد ذرات برروی رفتار اختلاط پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی. ضریب برخورد بین فازهای جامد نشان‌دهنده فعل‌وانفعالات ذرات در بسترسیال می‌باشد. ضریب برخورد باعث تغییرات ممنتم و نوسانات انرژی در طول فعل و انتقالات بین فازها می‌شود. ضریب برخورد برروی لزجت توده‌ای، فشار جامد و تنش برشی فاز جامد تأثیرگذار می‌باشد. در این پژوهش، سه نوع پوسته برنج انتخاب شده‌است. سه ضریب برخورد بین ذرات پوسته برنج (زیست‌توده) و شن سیلیس (ماده بستر) برروی رفتار اختلاط پوسته برنج و شن سیلیس در بسترسیال حبابی بررسی شده‌است. در این بررسی از ضریب لغزش جزئی برای هر دو فاز جامد استفاده شده‌است. سرعت ورودی هوا، کسر حجمی و چگالی ذرات ثابت فرض شده‌است. جدول (۲) ضرایب برخورد بین ذرات را نشان می‌دهد.

جدول ۲ ضرایب برخورد بین ذرات جامد

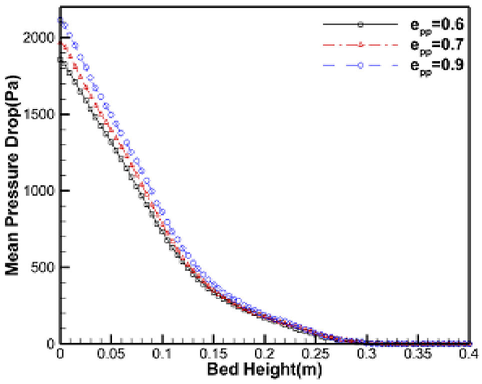
ضریب برخورد بین (شن– شن)	ضریب برخورد بین (پوسته برنج– پوسته برنج)	ضریب برخورد بین (پوسته برنج–شن)
۰/۹	۰/٦	۰/٦
۰/۹	۰/۷	۰/۷
۰/۹	۰/۹	۰/۹

بررسی اثر ضریب برخورد برروی توزیع رنگی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس. شکل (۹) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی پوسته برنج و شن سیلیس را برای سه ضریب برخورد (۰/۹ و ۰/۷، ۰/٦) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، متوسط کسر حجمی شن سیلیس (ماده بستر) در ورودی بسترسیال در مقایسه با پوسته برنج (زیست‌توده) بیشتر می‌باشد که نشان‌دهنده سیالیت پایین شن سیلیس به‌دلیل سنگین بودن آن می‌باشد. هرچه مقدار ضریب برخورد ذرات کاهش یابد، اضمحلال انرژی مکانیکی به‌دلیل افزایش برخورد غیر الاستیک ذرات افزایش می‌یابد؛ بنابراین ذرات پوسته برنج و شن سیلیس به‌خوبی با هم مخلوط می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد معیار اختلاط، شیب منحنی تغییرات سرعت و گرادیان سرعت می‌باشد. شکل (۹) نشان می‌دهد در حالتی که ضریب برخورد بین ذرات ۰/٦ باشد، شیب تغییرات سرعت در این حالت نسبت‌به دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد، بنابراین اختلاط مناسب‌تری در این حالت نسبت‌به دو ضریب برخورد دیگر انجام می‌شود. مقدار اختلاط در حالتی که ضریب برخورد ۰/٦ باشد نسبت‌به هنگامی‌که ضریب برخورد بین ذرات ۰/۷ باشد حدود ۸/۵٪ و نسبت‌به حالتی که ضریب برخورد بین ذرات ۰/۹ باشد حدود ۸/۲٪ افزایش می‌یابد. هم‌چنین کسر حجمی ذرات پوسته برنج (زیست‌توده) در مقایسه با شن سیلیس (ماده بستر) ناچیز می‌باشد که نشان‌دهنده وجود پدیده تفکیک قوی در فرایند سیالیت ذرات است. با افزایش ضریب برخورد، تجمع ذرات شن در کف بستر بیشتر می‌شود. تجمع ذرات پوسته برنج در ارتفاع بالاتری نسبت‌به کف بستر رخ می‌دهد و با افزایش ضریب برخورد نیز تجمع ذرات پوسته برنج افزایش می‌یابد. هم‌چنین بیشترین تجمع کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در دیوارها و کف بستر اتفاق می‌افتد.

بررسی اثر ضریب برخورد برروی افت فشار بسترسیال. شکل (۱۰) افت فشار بسترسیال با ضرایب مختلف برخورد ذرات را نشان می‌دهد. درنتیجه این بررسی مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب برخورد بین ذرات پوسته برنج و شن سیلیس، افت فشار نیز در بستر افزایش می‌یابد. هر چه ضریب برخورد افزایش پیدا کند، برخوردهای الاستیک نیز افزایش پیدا می‌کند. درنتیجه، اضمحلال انرژی مکانیکی ناشی از برخورد ذرات کاهش می‌یابد؛ بنابراین ذرات تمایلشان به جدایش از یکدیگر افزایش می‌یابد و اختلاط مناسبی میان ذرات پوسته برنج و شن سیلیس انجام نمی‌شود. هم‌چنین با تفکیک و جدایش ذرات پوسته برنج و شن سیلیس فضای خالی در بستر کاهش می‌یابد. این امر باعث افزایش افت فشار در بستر می‌شود. در شرایطی که ضریب برخورد بین ذرات ۰/۹ باشد، افت فشار به‌ترتیب ۱۳/۸٪ و ۷/۵٪ درصد نسبت‌به شرایطی که ضریب برخورد ۰/٦ و ۰/۷ باشد افزایش می‌یابد.

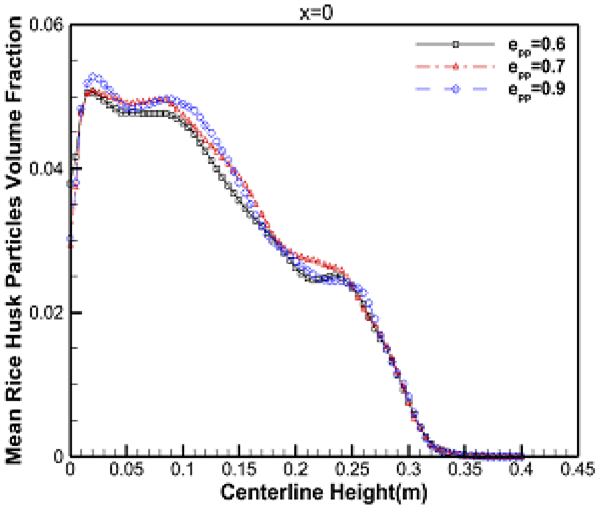


شکل ۹ (الف) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط ضریب برخورد ۰/۶، (ب) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط ضریب برخورد ۰/۷، (ج) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در شرایط ضریب برخورد ۰/۹، (د) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط ضریب برخورد ۰/۶، (ه) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط ضریب برخورد ۰/۷، (و) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در شرایط ضریب برخورد ۰/۹



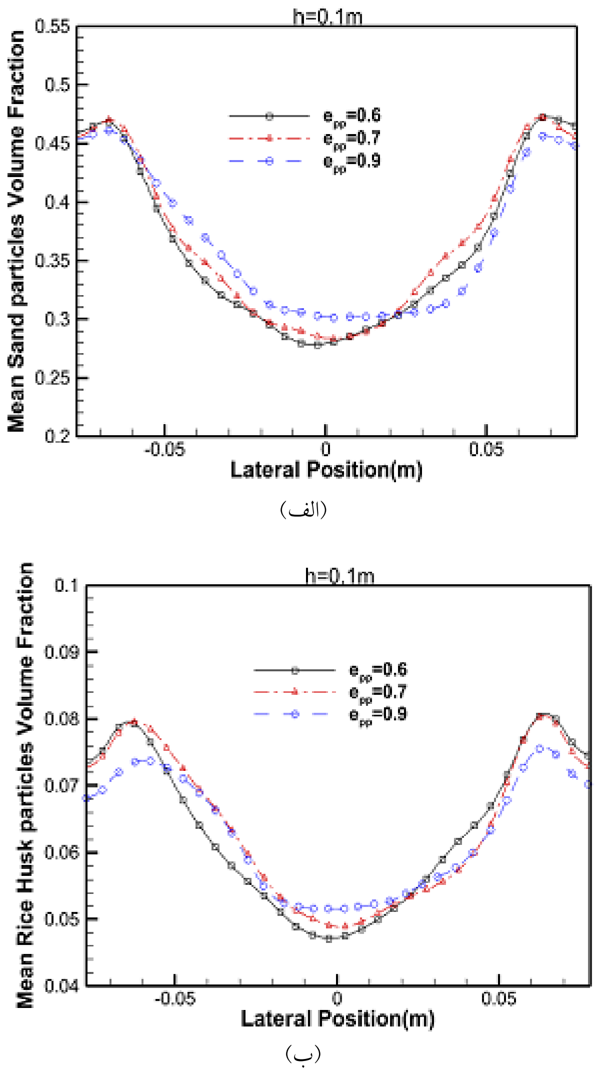
شکل ۱۰ اثر ضریب برخورد آیینه‌ای برروی افت فشار در طول امتداد بسترسیال

بررسی اثر ضریب برخورد برروی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در امتداد ارتفاع بستر. شکل (۱۱) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج را برای سه ضریب برخورد (۰/۹ و ۰/۷، ۰/٦) در امتداد ارتفاع مرکز بستر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با کاهش ضریب برخورد، ارتفاع بستر افزایش می‌یابد و متوسط کسر حجمی ذرات پوسته برنج کاهش می‌یابد. همچنین در ابتدا کسر حجمی ذرات پوسته برنج در امتداد ارتفاع بستر افزایش اندکی را نشان می‌دهد. به‌علت اثرات سرعت هوای ورودی این اتفاق روی می‌دهد. سپس کسر حجمی ذرات به‌تدریج کاهش می‌یابد. در نزدیکی محل اتصال بخش پایین و بالای بستر، کاهش کسر حجمی پوسته برنج با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد و با رسیدن به منطقه آزاد کسر حجمی ذرات پوسته برنج به صفر می‌رسد.



شکل ۱۱ اثر ضریب برخورد برروی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در امتداد ارتفاع بستر

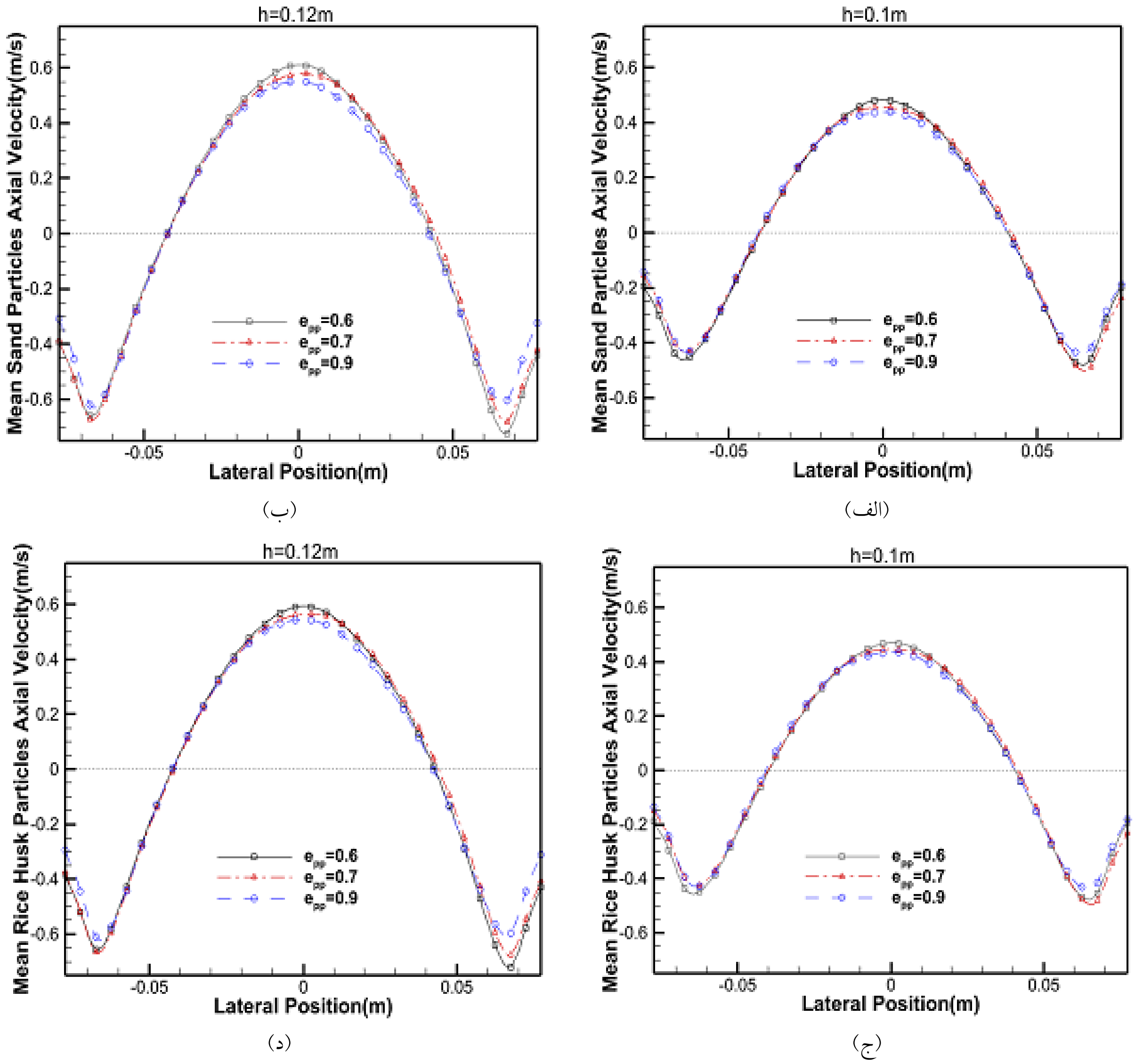
بررسی اثر ضریب برخورد برروی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بسترسیال. شکل (۱۲) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس را برای سه ضریب برخورد (۰/۹ و ۰/۷، ۰/٦) در ارتفاع ۰/۱ متر نسبت‌به کف بستر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، بیشترین کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در نزدیکی دیوارها به‌دلیل تجمع ذرات رخ می‌دهد. هر چه از سمت دیوارهای بستر به سمت مرکز بستر حرکت کنیم کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس کاهش می‌یابد. با کاهش ضریب برخورد، اتلاف ممنتم افزایش می‌یابد؛ درنتیجه، سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد و تجمع ذرات در مرکز بستر کاهش و در دیوارها افزایش می‌یابد. لذا، هنگامی‌که ضریب برخورد بین ذرات جامد ۰/٦ باشد، بیشترین متوسط زمانی کسر حجمی در دیوارهای بستر و کمترین متوسط کسر حجمی ذرات جامد در مرکز بستر پیش‌بینی می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع نسبت‌به کف بستر، کسر حجمی ذرات افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲ (الف) متوسط زمانی کسر حجمی ذرات شن سیلیس در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱ متر، (ب) متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج در جهت امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱ متر

بررسی اثر ضریب برخورد برروی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در امتداد محوری بسترسیال.

شکل (۱۳) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس را برای سه ضریب برخورد (۰/۹ و ۰/۷، ۰/٦) در ارتفاع‌های ۰/۱ متر و ۰/۱۲ متر نسبت‌به کف بستر نشان می‌دهد. پروفیل توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات برای پوسته برنج و شن سیلیس مشابه می‌باشد. مشاهده می‌شود در تمامی ضرایب برخورد، در نزدیکی دیوارها ذرات دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) هستند و به‌سمت پایین حرکت می‌کنند و در ناحیه مرکز بستر ذرات دارای سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) هستند و به‌سمت بالا حرکت می‌کنند؛ بنابراین در حوالی دیوارها با توجه به منفی بودن سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس جریان برگشتی رخ می‌دهد. با کاهش ضریب برخورد، سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) و سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات افزایش می‌یابد. با کاهش ضریب برخورد، متوسط سرعت ذرات شن سیلیس و پوسته برنج افزایش‌یافته و ذرات تمایلشان به چسبندگی و اختلاط افزایش می‌یابد. درنتیجه هر چه ضریب برخورد کاهش یابد توزیع یک‌نواخت‌تری میان ذرات پوسته برنج و شن سیلیس انجام می‌شود.



شکل ۱۳ (الف) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع ۰/۱ متر، (ب) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در ارتفاع، ۰/۱۲ متر، (ج) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱ متر، (د) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج در ارتفاع ۰/۱۲ متر

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی اثرات شرایط مرزی دیوار برای فازهای جامد و ضریب برخورد بین ذرات جامد پوسته برنج و شن سیلیس برروی فرایند اختلاط زیست‌توده (پوسته برنج) و ماده بستر (شن سیلیس) در بسترسیال حبابی به‌کمک رویکرد چند فازی اویلرین به‌همراه تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای پرداخته شده‌است. در این پژوهش توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس، توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس و افت فشار مطالعه شده‌است. به‌منظور مطالعه اثر ضریب برخورد آیینه‌ای، سه ضریب برخورد لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$، لغزش جزیی $(\emptyset = 0.5)$ و بدون لغزش $(\emptyset = 1)$ بررسی شده‌است. درنتیجه این مطالعه، در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در دیوارها و مرکز بستر نسبت‌به دو حالت لغزش جزیی و بدون لغزش بیشتر می‌باشد. هم‌چنین با افزایش ضریب برخورد آیینه‌ای افت فشار نیز افزایش می‌یابد. لذا، بیشترین افت فشار در شرایط بدون لغزش $(\emptyset = 1)$ پیش‌بینی می‌شود. پروفیل توزیع متوسط سرعت و کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در شرایط لغزش آزاد $(\emptyset = 0)$ نسبت‌به دو حالت بدون لغزش $(\emptyset = 1)$ و لغزش جزئی $(\emptyset = 0.5)$ متفاوت می‌باشد. در شرایط لغزش جزیی، بیشترین سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس مشاهده می‌شود. درنتیجه، هر چه مقدار سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش یابد، اختلاط یک‌نواخت‌تری میان ذرات پوسته برنج و شن سیلیس رخ می‌دهد. در ادامه این پژوهش به بررسی اثر ضریب برخورد ذرات با یکدیگر پرداخته شد. برای جهت انجام این مطالعه، ضریب برخورد ذرات شن- شن ۰/۹ و به‌صورت ثابت و ضرایب برخورد ذرات شن- پوسته برنج و پوسته برنج- پوسته برنج به‌ترتیب ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته شد. درنتیجه این مطالعه، با افزایش ضریب برخورد، متوسط زمانی کسر حجمی ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب برخورد بین ذرات، افت فشار نیز در بسترسیال افزایش می‌یابد. هر چه مقدار ضریب برخورد ذرات افزایش یابد، کسر حجمی ذرات در نزدیکی دیوارها کاهش و در مرکز بستر افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب برخورد، متوسط زمانی سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس در مرکز بستر کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده شد با کاهش ضریب برخورد، سرعت ذرات پوسته برنج و شن سیلیس و هم‌چنین برخوردهای غیر الاستیک افزایش می‌یابد. درنتیجه اضمحلال انرژی مکانیکی ناشی از برخورد ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این حالت، اختلاط ذرات پوسته برنج و شن سیلیس افزایش می‌یابد.

واژه نامه

اویلر- اویلری	Euler-Euler
اویلر- لاگرانژ	Euler-Lagrange
فشار جامد	Solid Pressure
تنش برشی	Shear Stress
تئوری انرژی جنبشی جریان دانه‌ای	Kinetic Theory of Granular Flow
کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی	The Energy Minimization Multi-Scale
مدل گاووس	Green Gauss Cell Based
ضریب برخورد آیینه‌ای	Specularity Coefficient
ضریب برخورد بین ذرات	Restitution Coefficient
مدل پسا	Drag Model
گیداسپاو	Gidaspow
هیل- کوچ- لند	Hill-Koch-Land
کا- اپسیلون- آر- ان- جی	K-e RNG
ارگان	Ergun
ون-یو	Wen-Yu
شملال- ابراین	Syamlal-Obrien
تابع توزیع شعاعی	Radial Distribution Function
لزجت برشی	Shear Viscosity
لزجت توده‌ای	Bulk Viscosity
لزجت برخورد	Collisional Viscosity
لزجت جنبشی	Kinematic Viscosity
هم‌بسته‌کردن	Coupling
مرتبه دوم ضمنی	Second Order Implicit Sheme
بدون لغزش	No Slip
نیروی برا	Lift Force
نیروی جرم مجازی	Virtual Mass Force

مراجع

1. Demirbas, M. F., Balat, M., and Balat, H., "Potential Contribution of Biomass to the Sustainable Energy Development", *Energy Conversion and Management*, Vol.50, No.5, Pp. 1746-1760, (2009).
2. Rao, T.R., and Bheemarasetti, J.R., "Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands", *Energy*, Vol. 26, No. 2, Pp. 633-644, (2001).
3. Abdullah, M.Z., Husain, Z., and Pong, S.Y., "Analysis of Cold Flow Fluidization Test Results for Various Biomass Fuels", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 24, No. 6, Pp. 487-494, (2003).
4. Clarke, K.L., Pugsley, T., and Hill, G.A., "Fluidization of Moist Sawdust in Binary Particle Systems in a Gas–Solid Fluidized Bed", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No.24, Pp. 6909-6918, (2005).
5. Zhong, W., Jin, B., Zhang, Y., Wang, X., and Xiao, R., "Fluidization of Biomass Particles in a Gas− Solid Fluidized Bed", *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 6, Pp. 4170-4176, (2008).
6. Cui, H., and Grace, J.R., "Fluidization of Biomass Particles: A Review of Experimental Multiphase Flow Aspects", *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 1-2, Pp. 45-55, (2007).
7. Qiaoqun, S., Huilin, L., Wentie, L., Yurong, H., Lidan, Y., and Gidaspow, D., "Simulation and Experiment of Segregating/mixing of Rice Husk–Sand Mixture in a Bubbling Fluidized Bed", *Fuel*, Vol. 84, No. 14-15, Pp. 1739-1748, (2005).
8. Xie, L., Zhu, J., and Jiang, C., "Quantitative Study of Mixing/Segregation Behaviors of Binary-Mixture Particles in Pilot-Scale Fluidized Bed Reactor", *Powder Technology*, Vol. 377, Pp. 103-114, (2021).
9. Hameed, S., Sharma, A., and Pareek, V., "Modelling of Particle Segregation in Fluidized Beds", *Powder Technology*, Vol. 353, Pp. 202-218, (2019).
10. Anicic, B., Lu, B., Lin, W., Wu, H., Dam- Johansen, K., and Wang, W., "CFD Simulation of Mixing and Segregation of Binary Solid Mixtures in a Dense Fluidized Bed", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 98, No. 1, Pp. 412-420, (2020).
11. Karami, S., Goharrizi, A.S., Abolpour, B., and Darijani, S., "Numerical Study of the Particles Segregation Phenomenon in the Fluidized Beds", *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, (2019).
12. Khezri, R., Wan Ab Karim Ghani, W.A., Masoudi Soltani, S., Awang Biak, D.R., Yunus, R., Silas, K., Shahbaz, M., and Rezaei Motlagh, S., "Computational Fluid Dynamics Simulation of Gas–Solid Hydrodynamics in a Bubbling Fluidized-Bed Reactor: Effects of Air Distributor, Viscous and Drag Models", *Processes*, Vol. 7, No. 8, Pp. 524, (2019).
13. Wang, L., Xie, X., Wei, G., and Li, R., "Numerical Simulation of Hydrodynamic Characteristics in a Gas–Solid Fluidized Bed", *Particulate Science and Technology*, Vol. 35, No. 2, Pp. 177-182, (2017).
14. Varghese, M.M., and Vakamalla, T.R., "Effect of Turbulence Model on the Hydrodynamics of Gas–solid Fluidized Bed", *Recent Trends in Fluid Dynamics Research.*, Pp. 47-61, Springer, Singapore, (2022).
15. Upadhyay, M., Kim, A., Kim, H., Lim, D., and Lim, H., "An Assessment of Drag Models in Eulerian–Eulerian Cfd Simulation of Gas–Solid Flow Hydrodynamics in Circulating Fluidized bed Riser", *ChemEngineering*, Vol. 4, Pp. 37, (2020).

16. Lahlaouti, M.L., and Kharbouch, B., "CFD-Simulation of Gas-Solid Flow in Bubbling Fluidized Bed Reactor", *E3S Web of Conferences*., Vol. 336, Pp. 59-67, EDP Sciences, (2022).
17. Zinani, F., Philippsen, C.G., and Indrusiak, M.L.S., "Numerical Study of Gas–Solid Drag Models in a Bubbling Fluidized Bed", *Particulate Science and Technology*, Vol. 36, No. 1, Pp. 1-10, (2018).
18. Guo, Y., Deng, B., Ge, D., and Shen, X., "CFD Simulation on Hydrodynamics in Fluidized Beds: Assessment of Gradient Approximations and Turbulence Models", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 8, Pp. 1067-1074, (2015).
19. Verma, V., Padding, J.T., Deen, N.G., and Kuipers, J.A.M., "Effect of Bed Size on Hydrodynamics in 3- D Gas–Solid Fluidized Beds", *AIChE Journal*, Vol. 61, No. 5, Pp. 1492-1506, (2015).
20. Wang, L., Du, X., Sun, J., Xie, X., and Duan, S., "A Comparative Study on the Drag Model Applicability and Influence of Fluidized Velocity on Hydrodynamics of Fluidized Bed", *12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*., Pp. 1-5, IEEE, (2020).
21. Aiche, F., Belaadi, S., Lalaoua, A., Berrouk, A.S., and Azzi, A., "Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Investigation of Hydrodynamics Behaviour of Gas–Solid Flow in Fluidized Bed of Geldart D Particles", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 235, No. 4, Pp. 1005-1016, (2021).
22. Chapman, S., and Cowling, T.G., "The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases: An Account of the Kinetic Theory of Viscosity, Thermal Conduction and Diffusion in Gases", Cambridge university press., (1990).
23. Du, W., Bao, X., Xu, J., and Wei, W., "Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Spouted Bed: Assessment of Drag Coefficient Correlations", *Chemical Engineering Science,* Vol. 61, No. 5, Pp. 1401-1420, (2006).
24. Li, T., and Guenther, C., "A CFD Study of Gas–Solid Jet in a CFB Riser Flow", *AIChE Journal*, Vol. 58, No. 3, Pp. 756-769, (2012).
25. Wang, J., "Flow Structures inside a Large-Scale Turbulent Fluidized Bed of FCC Particles: Eulerian Simulation with an EMMS-Based Sub-Grid Scale Model", *Particuology*, Vol. 8, No.2, Pp. 176-185, (2010).
26. Xue, Q., Heindel, T.J., and Fox, R.O., "A CFD Model for Biomass Fast Pyrolysis in Fluidized-Bed Reactors", *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, No. 11, Pp. 2440-2452, (2011).
27. Armstrong, L.M., Gu, S., and Luo, K.H., "Study of Wall-to-Bed Heat Transfer in a Bubbling Fluidised Bed Using the Kinetic Theory of Granular Flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 21-22, Pp. 4949-4959, (2010).
28. Goldschmidt, M.J.V., Kuipers, J.A.M., and van Swaaij, W.P.M., "Hydrodynamic Modelling of Dense Gas-Fluidised Beds Using the Kinetic Theory of Granular Flow: Effect of Coefficient of Restitution on Bed Dynamics", *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, No. 2, Pp. 571-578, (2001).
29. Jung, J., Gidaspow, D., and Gamwo, I.K., "Bubble Computation, Granular Temperatures, and Reynolds Stresses", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 193, No. 8, Pp. 946-975, (2006).
30. Wang, X.Y., Jiang, F., Xu, X., Fan, B.G., Lei, J., and Xiao, Y.H., "Experiment and CFD Simulation of Gas–Solid Flow in the Riser of Dense Fluidized Bed at High Gas Velocity", *Powder Technology*, Vol. 199, No. 3, Pp. 203-212, (2010).

31. Sasic, S., Johnsson, F., and Leckner, B., "Inlet Boundary Conditions for the Simulation of Fluid Dynamics in Gas–Solid Fluidized Beds", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 16, Pp. 5183-5195, (2006).
32. Van Wachem, B.G.M., Schouten, J.C., Van den Bleek, C.M., Krishna, R., and Sinclair, J.L., "Comparative Analysis of CFD Models of Dense Gas–Solid Systems", *AIChE Journal*, Vol. 47, No. 5, Pp. 1035-1051, (2001).
33. Wang, J., Ge, W., and Li, J., "Eulerian Simulation of Heterogeneous Gas–Solid Flows in CFB Risers: EMMS-Based Sub-Grid Scale Model with a Revised Cluster Description", *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, No. 6, Pp. 1553-1571, (2008).
34. Yang, N., Wang, W., Ge, W., Wang, L., and Li, J., "Simulation of Heterogeneous Structure in a Circulating Fluidized-Bed Riser by Combining the Two-Fluid Model with the EMMS Approach", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 43, No. 18, Pp. 5548-5561, (2004).
35. Kshetrimayum, K.S., Park, S., Han, C., and Lee, C.J., "EMMS Drag Model for Simulating a Gas–Solid Fluidized Bed of Geldart B Particles: Effect of Bed Model Parameters and Polydisperity", *Particuology*, Vol. 51, Pp. 142-154, (2020).
36. Fede, P., Simonin, O., and Ingram, A., "3D Numerical Simulation of a Lab-Scale Pressurized Dense Fluidized Bed Focussing on the Effect of the Particle-Particle Restitution Coefficient and Particle–Wall Boundary Conditions", *Chemical Engineering Science*, Vol. 142, Pp. 215-235, (2016).
37. Abdelmotalib, H.M., and Im, I.T., "Simulation Study of the Effect of the Restitution Coefficient on Interphase Heat Transfer Processes and Flow Characteristics in a Fluidized Bed", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 75, No. 12, Pp. 841-854, (2019).
38. Kotoky, S., Dalal, A., and Natarajan, G., "Effects of Specularity and Particle-Particle Restitution Coefficients on the Hydrodynamic Behavior of Dispersed Gas-Particle Flows through Horizontal Channels", *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, No.4, Pp. 874-889, (2018).
39. Huilin, L., Yurong, H., and Gidaspow, D., "Hydrodynamic Modelling of Binary Mixture in a Gas Bubbling Fluidized Bed Using the Kinetic Theory of Granular Flow", *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, No.7, Pp. 1197-1205, (2003).
40. Taghipour, F., Ellis, N., and Wong, C., "Experimental and Computational Study of Gas–Solid Fluidized Bed Hydrodynamics", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 24, Pp. 6857-6867, (2005).
41. Anderson, T.B., and Jackson, R., "Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds. Equations of Motion", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 6, No. 4, Pp. 527-539, 1967.
42. Bowen, R.M., "Theory of Mixtures", *Continuum physics*., (1976).
43. "ANSYS Fluent Theory Guide 12.0", *ANSYS. Inc*., (2009).
44. Ding, J., and Gidaspow, D., "A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow", *AIChE Journal*, Vol. 36, No. 4, Pp. 523-538, (1990).
45. Gidaspow, D., Bezburuah, R., and Ding, J., "Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach", Illinois Inst. of Tech, United States, (1991).

46. Wen, C.Y., "Mechanics of Fluidization", *Chemical engineering progress symposium series.*, Vol. 62, Pp. 100-111, (1966).
47. Ergun, S., "Fluid Flow through Packed Columns", *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, Pp. 89-94, (1952).
48. Richardson, J.T., "Sedimentation and Fluidisation: Part I", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. *32*, Pp. 35-53, (1954).
49. Syamlal, M., "The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization", *EG and G Washington Analytical Services Center, Inc.*, Morgantown, USA, (1987).
50. Ogawa, S., Umemura, A., and Oshima, N., "On the Equations of Fully Fluidized Granular Materials", *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, Vol. 31, No. 4, Pp. 483-493, (1980).
51. Syamlal, M., Rogers, W., and OBrien, T.J., "MFIX Documentation Theory Guide", USDOE Morgantown Energy Technology Center, United States, (1993).
52. Lun, C.K.K., Savage, S.B., Jeffrey, D.J., and Chepurniy, N., "Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flowfield", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 140, Pp. 223-256, (1984).
53. Johnson, P.C., and Jackson, R., "Frictional–Collisional Constitutive Relations for Granular Materials, with Application to Plane Shearing", *Journal of fluid Mechanics*, Vol. 176, Pp. 67-93, (1987).
54. Kuwagi, K., Utsunomiya, H., Shimoyama, Y., Hirano, H., and Takami, T., "Direct Numerical Simulation of Fluidized Bed with Immersed Boundary Method", (2010).
55. Hoomans, B.P.B., "Granular Dynamics of Gas-Solid Two-Phase Flows", Universiteit Twente., (2000).
56. Peltola, J., "Dynamics in a Circulating Fluidized Bed: Experimental and Numerical Study", (2009).
57. Sharma, A., Wang, S., Pareek, V., Yang, H., and Zhang, D., "CFD Modeling of Mixing/Segregation Behavior of Biomass and Biochar Particles in a Bubbling Fluidized Bed", *Chemical Engineering Science*, Vol. 106, Pp. 264-274, (2014).
58. Ge, J., and Monroe, C.A., "The Effect of Coefficient of Restitution in Modeling of Sand Granular Flow for Core Making: Part I Free-Fall Experiment and Theory", *International Journal of Metalcasting*, Vol. 13, No. 4, Pp. 753-767, (2019).
59. Ahmad, N., Tong, Y., Lu, B., and Wang, W., "Extending the EMMS-Bubbling Model to Fluidization of Binary Particle Mixture: Parameter Analysis and Model Validation", *Chemical Engineering Science*, Vol. 200, Pp. 257-267, (2019).
60. Parvathaneni, S., and Buwa, V.V., "Eulerian Multifluid Simulations of Segregation and Mixing of Binary Gas-Solids Flow of Particles with Different Densities", *Chemical Engineering Science*, Vol. 245, Pp. 116901, (2021).
61. Gorin, A., Chok, V., Wee, S., and Chua, H., "Hydrodynamics of Binary Mixture Fluidization in a Compartmented Fluidized Bed", *18th International Congress of Chemical and Process Engineering*., Chemical Equipment Design and Automation, (2008).
62. Wang, H., and Zhong, Z., "A Mixing Behavior Study of Biomass Particles and Sands in Fluidized Bed Based on CFD-DEM Simulation", *Energies*, Vol. 12, No. 9, Pp. 1801, (2019).